

UNIVERSITE DE NANCY

1967

FACULTE DES SCIENCES

T H È S E S

présentées à la Faculté des Sciences de Nancy

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE (MENTION SCIENCES)

par

Jean CHATAIGNON

Première Thèse

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EXTRACTION
SOLIDE - LIQUIDE**

Deuxième Thèse

L'ANALYSE PAR FLUORESCENCE X

JURY :

M. le Professeur GIBERT Président

M. le Professeur LE GOFF Examinateurs

M. le Professeur HEROLD

M. le Professeur DONNET Invité

1967

T H È S E S

présentées à la Faculté des Sciences de Nancy

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE (MENTION SCIENCES)

par

Jean CHATAIGNON

Première Thèse

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EXTRACTION
SOLIDE - LIQUIDE

Deuxième Thèse

L'ANALYSE PAR FLUORESCENCE X

JURY :

M. le Professeur GIBERT	Président
M. le Professeur LE GOFF	Examineurs
M. le Professeur HEROLD	
M. le Professeur DONNET	Invité

Doyen : M. AUBRY

Assesseur : M. GAY

Doyens Honoraires : MM. CORNUBERT - DELSARTE - ROUBAULT.

Professeurs Honoraires : MM. RAYBAUD - LAFFITTE - LERAY - JULY - LAPORTE - EICHHORN - GODEHENT - DUBREUIL - L. SCHWARTZ - DIEUDONNE - DE MALLEMANN - LONGCHAMBON - LETORT - DODE - GAUTHIER - GOUDET - OLMER - CORNUBERT - CHAPELLE - GUERIN - WAHL.

Maîtres de Conférences Honoraires : MM. LIEHNART - PIERRET.

Professeurs

MM. DELSARTE	Analyse Supérieure
ROUBAULT	Géologie
CAPELLE	Mécanique Rationnelle
VEILLET	Biologie Animale
BARRIOL	Chimie Théorique
BIZETTE	Physique
GUILLIEN	Electronique
GIBERT	Chimie Physique
LEGRAS	Mécanique Rationnelle
BOLFA	Minéralogie et Cristallographie
NICLAUSE	Chimie
FAIVRE	Physique appliquée
AUBRY	Chimie Minérale
COPPENS	Radiogéologie
DUVAL	Chimie
FRULHING	Physique
HILLY	Géologie
LE GOFF	Génie Chimique
SUHNER	Physique Expérimentale
CHAPON	Chimie Biologique
HEROLD	Chimie Minérale Industrielle
SCHWARTZ B.	Exploitation Minière
* MALAPRADE	Chimie
MANGENOT	Botanique
GAYET	Physiologie
BONVALET	Mécanique appliquée
HADNI	Physique
* BASTICK	Chimie
DUCHAUFOR	Pédologie
GARNIER	Agronomie

Professeurs (Suite)

MM. NEEL	Chimie Organique Industrielle
BERNARD	Géologie appliquée
* CHAMPIER	Physique
* GAY	Chimie Biologique
STEPHAN	Zoologie
* CONDE	Zoologie
* WERNER	Botanique
EYMARD	Calcul Différentiel et Intégral
LEVISALLES	Chimie Organique
Mme HERVE	Méthodes Mathématiques de la Physique
* GOSSE	Mécanique Physique
FELDEN	Physique
* DAVOINE	Physique (ENSMIM)
N.....	Chimie Biologique

* Professeur titulaire à titre personnel.

Maîtres de Conférences

Mme BASTICK	Chimie M. P. C. (Epinal)
MM. GUDEFIN	Physique
ROCCI	Géologie
VUILLAUME	Psychophysiologie
FRENTZ	Biologie Animale
HORN	Physique propédeutique
LAFON	Physique (I. S. I. N.)
MARI	Chimie (I. S. I. N.)
AUROUZE	Géologie
DEVIOT	Physique du solide
FLECHON	Physique M. P. C.
Mle HUET	Mathématiques S. P. C. N. (en disponibilité)
VIGNES	Métallurgie
BALESDENT	Thermodynamique chimique appliquée
BLAZY	Minéralogie appliquée (E. N. S. G.)
JANOT	Physique M. P. C. (Epinal)
JACQUIN	Pédologie et chimie agricole
MAINARD	Physique M. G. P.
CACHAN	Entomologie appliquée (E. N. S. A.)
MARTIN	Chimie M. P. C.
PAULMIER	Mécanique expérimentale
PROTAS	Minéralogie
COURTILLOT	Mécanique des Fluides
JOZEFOWICZ	Physico-chimie
JURAIN	Géologie (S. P. C. N.)
RIVAIL	Chimie appliquée (C. U. C. E. S.)
VILLERMAUX	Génie Chimique
METCHE	Biochimie appliquée (Brasserie)



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555020_0021

N...	Probabilités et statistiques
N...	Mécanique (I. S. I. N.)
N...	Mathématiques
N...	Mathématiques M. P. C.
N...	Mathématiques S. P. C. N.
N...	Mathématiques appliquées
N...	Mécanique des fluides (I. S. I. N.)
N...	Physiologie animale
N...	Mathématiques M. P.

°
° °

A LA MEMOIRE DE MES PARENTS

A MA FEMME

A MES ENFANTS

La présente étude a été effectuée au Service de Recherches des MINES DOMANIALES DE POTASSE D'ALSACE.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur DELACÔTE, Directeur Général des M.D.P.A., de m'avoir permis de publier ce travail et fourni les moyens matériels de le mener à bonne fin.

J'exprime ma gratitude à Monsieur BERTHON, Chef du Service de Recherches des M.D.P.A., pour l'aide qu'il m'a apportée tout au long de cette étude.

Ma reconnaissance va également à Monsieur LE GOFF, Professeur de Génie Chimique à la Faculté des Sciences de Nancy, pour les conseils qu'il m'a prodigués en me faisant bénéficier de sa compétence.

J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur le Professeur DONNET, Directeur Adjoint de l'Ecole Supérieure de Chimie de Mulhouse, pour l'intérêt qu'il m'a constamment manifesté.

Je suis sensible à l'honneur que m'a fait Monsieur le Professeur GIBERT de bien vouloir présider le Jury de cette thèse.

Je remercie enfin Monsieur le Professeur HEROLD d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Je ne saurais oublier, pour terminer, mes collaborateurs du Service de Recherches, qui m'ont assisté dans les travaux relatifs à la partie expérimentale de mon étude.

CONTRIBUTION A L'ETUDE
DE L'EXTRACTION SOLIDE-LIQUIDE

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EXTRACTION SOLIDE-LIQUIDE

Sommaire

L'extraction solide-liquide dont il est question dans cette étude se rapporte essentiellement au lavage des pulpes.

Dans une 1ère partie d'Introduction, nous situons d'abord le problème du lavage des pulpes dans le cadre de l'industrie potassique. Puis de l'analyse bibliographique nous déduisons que, pour le lavage par dilution, les méthodes algébriques proposées par les auteurs précédents sont insuffisantes parce que limitées pratiquement au cas de l'équi-épaississement, et que les méthodes graphiques sont souvent mal adaptées aux problèmes à résoudre, le lavage par déplacement n'ayant de son côté fait l'objet d'aucune étude approfondie.

Dans une 2ème partie, concernant le Lavage par dilution, nous exposons, en supposant l'homogénéisation complète des pulpes et des solutions de lavage à l'entrée des différents étages, une théorie algébrique générale du lavage à contre-courant dans le cas d'épaississements absolument quelconques des pulpes. Puis nous indiquons comment cette théorie peut être étendue au cas de l'homogénéisation incomplète par l'introduction des "coefficients de dilution". Nous passons ensuite en revue les trois principales méthodes graphiques qui peuvent être employées (dont l'une, fondée sur les "quantités de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence", est originale).

Dans une 3ème partie, relative au Lavage par déplacement, nous montrons comment, par l'introduction des "coefficients de déplacement", l'étude algébrique de ce type de lavage peut se ramener à celle du lavage par dilution. Ensuite, au cours d'un travail expérimental ayant trait à l'enrichissement d'un concentré de chlorure de potassium au moyen d'un lavage par déplacement, nous examinons au laboratoire l'influence des paramètres qui régissent un tel lavage, afin de connaître les résultats que l'on peut obtenir dans les meilleures conditions et en déduire le mode opératoire industriel le plus efficace.

°
° °

I - INTRODUCTION

I - INTRODUCTION

Sommaire

L'extraction solide-liquide dont il est question ici a trait essentiellement au **Lavage des pulpes**.

Le problème du lavage des pulpes se pose dans l'industrie potassique, d'une part pour l'épuisement des boues (lavage par dilution), d'autre part pour l'épuisement des résidus ou l'enrichissement des concentrés (lavages par déplacement), ces opérations de lavage se faisant toujours avec des quantités d'eau limitées.

D'une manière générale, nous appellerons "pulpe" toute suspension de particules ou de grains solides au sein d'une solution contenant un ou plusieurs solutés. Une pulpe peut toujours se ramener à un mélange de trois constituants, à savoir : solides (ou insolubles), soluté et solvant.

Le but poursuivi dans le lavage d'une pulpe sera, suivant les cas, soit de purifier les solides, soit de récupérer les solutés contenus dans la solution, soit de **réaliser les deux opérations simultanément**.

Il existe deux grandes sortes de lavages : lavage par dilution et lavage par déplacement. Qu'il soit par dilution ou par déplacement, le lavage d'une pulpe peut être effectué de deux façons principales : lavage à courants croisés ou fractionné, lavage à contre-courant ou méthodique (ces deux types de lavage étant évidemment confondus lorsqu'ils ne comportent qu'un seul étage). Nous n'envisagerons ici que le lavage à contre-courant, plus efficace que le lavage à courants croisés et de beaucoup le plus important industriellement.

Le lavage des pulpes apparaît en définitive comme une opération particulière et originale qui relève à la fois de l'extraction et de la séparation solide-liquide et qui entre dans la catégorie générale des opérations de transfert de matière du Génie Chimique. A ce titre, le problème du lavage présente des analogies plus ou moins étroites avec les nombreux autres problèmes où l'on a à fractionner des **systèmes** à trois constituants.

Les méthodes utilisées pour la résolution des problèmes de lavage des pulpes sont soit des méthodes algébriques, soit des méthodes graphiques.

Pour ce qui est des méthodes algébriques se rapportant au lavage par dilution à contre-courant, toutes celles décrites dans la littérature, ou bien se limitent au cas de l' "équi-épaississement" des pulpes aux différents étages ou à des cas plus compliqués mais toujours particuliers, ou bien supposent que les épaississements de ces pulpes sont liés à la concentration en soluté de leurs solutions d'imprégnation par des lois simples mais souvent fort éloignées de la réalité. Par ailleurs, une notion aussi importante que celle de lavage "équilibré" (selon notre terminologie) n'est même pas signalée. Quant au lavage par déplacement, l'analyse de son

processus et des paramètres qui le conditionnent n'a fait l'objet d'aucune étude approfondie.

En ce qui concerne les méthodes graphiques appliquées au lavage par dilution et mentionnées dans la littérature, elles se réduisent pratiquement, pour le lavage à épaississements quelconques, à celle fondée sur l'utilisation des "compositions" relativement aux trois constituants sur le diagramme triangulaire. La méthode algébrique et les méthodes graphiques reposent sur les mêmes hypothèses de départ et connaissent par suite les mêmes limitations. Les méthodes graphiques - qui visent essentiellement à la détermination du nombre d'étages d'une installation - sont ordinairement mal adaptées aux types de problèmes qui peuvent se poser lorsque l'objet du lavage est la récupération des solutés, et par ailleurs elles se prêtent difficilement à une discussion générale, surtout dans les cas complexes. Ajoutons qu'une étude algébrique préalable est souvent nécessaire à la compréhension et à l'interprétation des méthodes graphiques.

°
° °

PRELIMINAIRES

ET

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

L'extraction solide-liquide dont il est question dans cette étude a trait essentiellement au Lavage des Pulpes.

Dans le cas de l'Industrie Potassique, le problème du Lavage des Pulpes se présente de la manière ci-après.

Le sel brut ou minerai de potasse (encore appelé sylvinite), tel qu'on l'extrait du fond de la mine, est formé principalement de sylvine (KCl), de halite (NaCl) et de produits insolubles (schistes). La composition de ce sel brut est en moyenne approximativement la suivante : 30 % KCl, 60 % NaCl, 10 % Insolubles.

Le sel brut, une fois remonté à la surface, est traité pour en éliminer la majeure partie de ses impuretés NaCl et insolubles et fournir un concentré de chlorure de potassium titrant généralement 60 % K_2O , soit 95 % KCl. Cette séparation se fait soit par le procédé thermique, soit par flottation. Dans le procédé thermique, le sel brut (broyé 0-4 mm) est mis en contact avec une eau-mère H_2O -KCl-NaCl saturée à froid (25-30°C) et réchauffée à 100°C, qui épuise le minerai de la quasi-totalité de son KCl sans dissoudre pratiquement de NaCl, la saumure obtenue laissant, corrélativement, déposer presque exclusivement du KCl par refroidissement. Dans le procédé par flottation, le KCl du sel brut (broyé 0-1 mm) est flotté sélectivement en eau-mère à l'aide de réactifs appropriés.

Dans les deux procédés, au cours du traitement du sel brut, l'insoluble contenu dans celui-ci se divise en deux parties à peu près égales : une fraction friable, constituée surtout par des schistes légers argileux, qui passe en suspension boueuse dans les saumures et les eaux-mères à l'état de particules extrêmement fines (de diamètre inférieur à quelques dizaines de microns) ; et une fraction non effritée, formée surtout de schistes lourds riches en anhydrite et dolomie, qui est évacuée directement avec le NaCl sous forme de résidus.

Si l'insoluble argileux en suspension dans les saumures et les eaux-mères n'était pas éliminé, il provoquerait un embourbement progressif des circuits qui gênerait considérablement et rendrait même rapidement impossible la marche de l'usine. Il est donc indispensable de placer sur le trajet de ces pulpes boueuses, des décanteurs, au trop-plein et à la partie inférieure desquels on recueille respectivement des solutions clarifiées (en ayant généralement recours à la floculation) et des boues épaissies. C'est le problème de la décantation.

Si les boues épaissies soutirées à la pointe des décanteurs étaient rejetées telles quelles, il en résulterait des pertes élevées de KCl sous forme de solutions d'imprégnation saturées à la température correspondante. Il est donc nécessaire, pour diminuer ces pertes, de procéder à un lavage des boues décantées, en l'occurrence un lavage par dilution à contre-courant (exceptionnellement à courants croisés),

dans des décanteurs-laveurs. Le lavage des boues des usines thermiques est un lavage polytherme à températures décroissantes, celles-ci variant pratiquement de 100°C pour les boues initiales qui entrent dans l'installation de lavage, à 40°C pour les boues lavées qui en sortent, les épaissements des boues allant corrélativement en diminuant. Le lavage des boues de flottation est par contre un lavage isotherme à la température ambiante.

Quant aux résidus sortant des appareils de dissolution thermiques ou des cellules de flottation, ils sont formés par des solides de structure granuleuse constitués par la presque totalité du NaCl initialement contenu dans le sel brut, les schistes non friables et un peu de KCl résiduaire. Ces résidus sont, avant leur évacuation, séparés de la majeure partie de leur solution d'imprégnation par filtration en continu, soit sur des tables filtrantes à axe vertical pour les résidus thermiques, soit sur des filtres à tambour rotatif à axe horizontal pour les résidus de flottation (+). Le lavage des gâteaux obtenus est, dans tous les cas, un lavage par déplacement, réalisé au moyen de rampes d'arrosage.

Ajoutons que l'on est fréquemment amené à enrichir les concentrés pour fabriquer du chlorure de potassium à haute teneur (62,5 % K₂O, soit environ 99 % KCl) destiné à certains usages industriels spéciaux. L'impureté est dans ce cas constituée par du NaCl, présent tant à l'état solide (NaCl ayant cristallisé en même temps que le KCl) qu'à l'état dissous sous forme d'eau-mère d'imprégnation. Là encore, on procède à un lavage du sel par déplacement - mais en discontinu - dans des "égoutteuses" industrielles.

Le volume global des eaux-mères en circulation dans l'usine devant être maintenu constant, il doit en être de même de celui de l'eau, qui constitue ainsi un véritable "invariant" de la fabrication. Le bilan d'eau de l'usine exprime donc que les sorties d'eau sont exactement compensées par des rentrées d'eau équivalentes. Les principales sorties d'eau ont lieu avec les boues, avec les résidus et avec les concentrés (évaporation dans les fours sécheurs) sous forme de solutions d'imprégnation. Une autre sortie d'eau, particulière aux usines thermiques, réside en la "quantité nette" d'eau évaporée dans les appareils de cristallisation sous vide. Cette "quantité nette" est égale à la différence entre la quantité totale d'eau évaporée assurant le refroidissement de la saumure et la quantité d'eau qui doit être réintroduite dans les évaporateurs pour opérer l'ajustement à 60 % K₂O de la teneur des concentrés (du fait de cette évaporation partielle, il y a en effet cristallisation d'une certaine quantité de NaCl à côté du KCl). Après déduction de diverses rentrées d'eau secondaires, accidentelles ou parasites, le complément par rapport aux sorties d'eau totales peut être utilisé pour les différentes opérations de lavage des boues, des résidus et éventuellement des concentrés (enrichissement). On a évidemment intérêt à réduire au maximum les rentrées d'eau accidentelles ou parasites afin de pouvoir disposer, pour les opérations de lavage, de la plus grande quantité d'eau possible (la quantité totale d'eau disponible pour ces opérations de lavage restant cependant obligatoirement limitée). Dans les usines thermiques, du fait de la sortie d'eau supplémentaire constituée par la "quantité nette" d'eau évaporée dans les appareils de cristallisation sous vide, les lavages

(+) Pour ces séparations on utilise aussi desessoreuses.

des boues et des résidus seront normalement "déséquilibrés par excès" relativement à l'eau. Dans les usines de flottation, par contre, ces lavages ne pourront être guère mieux qu' "équilibrés" par rapport à l'eau (+).

Par ailleurs, les installations de lavage dans l'industrie potassique se caractérisent par un petit nombre d'étages : deux ou trois au maximum pour les lavages par dilution à contre-courant des boues ; un étage unique pour les lavages par déplacement progressif des résidus ou des concentrés. Elles se distinguent en outre par les grands débits traités (plusieurs dizaines de tonnes de solides lavés à l'heure, pour les appareils en marche continue). Aussi, dans le cas du lavage des boues, les décanteurs-laveurs utilisés à chaque stade ont des dimensions importantes (20 à 30 mètres de diamètre) et leurs prix atteignent des sommes élevées. Le nombre d'étages de lavage n'est alors déterminé que par des considérations d'ordre économique, sans incidences techniques (prix du KCl que permet de récupérer un étage supplémentaire, comparé aux frais d'immobilisation et de fonctionnement de celui-ci).

Si la détermination du nombre d'étages du lavage par dilution des boues ne présente pas de difficultés particulières, on peut par contre se poser un certain nombre de questions au sujet des autres paramètres du lavage. Quel est l'effet de l'amélioration de l'épaississement des boues dans un laveur donné à l'aide d'un dispositif spécial éventuel ? (vu l'importance des débits et le petit nombre d'étages, un accroissement même limité de l'épaississement peut entraîner une récupération non négligeable de KCl au bout d'une année). Disposant d'une certaine masse horaire d'eau de lavage, quelle doit en être la répartition entre les boues et les résidus pour que la perte KCl totale soit minimale ? Si l'on fait subir à cette eau certaines opérations préalables de "ringage", quelle fraction de la quantité de KCl contenue dans la solution résultante récupérera-t-on dans l'opération de lavage des boues ? Quel est l'effet de la présence, dans les boues initiales, d'une certaine quantité de KCl à l'état solide ? A quelle condition peut-on retirer un gain de l'abaissement de la concentration en KCl de la solution d'imprégnation des boues thermiques par addition d'eaux-mères et quelle est l'importance de ce gain ? etc.

En ce qui concerne le lavage par déplacement - surtout lorsqu'il s'agit de l'enrichissement des concentrés en égoutteuses - on peut notamment se demander quelle est la meilleure technique à adopter pour que le lavage ait l'efficacité maximale.

Les différentes matières sur lesquelles on effectue, dans l'industrie potassique, des opérations de lavage en vue d'une récupération de soluté ou d'un enrichissement (boues, résidus, concentrés) présentent un certain nombre de caractères communs qui nous les font désigner sous le nom générique de "pulpes".

D'une manière générale, nous appellerons "pulpe" toute suspension de particules ou de grains solides au sein d'une solution contenant un ou plusieurs solutés (une partie des solutés pouvant toutefois se trouver à l'état solide ou indissous dans la pulpe considérée). Les particules en suspension - que nous nommerons indiffé-

(+) La signification des expressions "lavage équilibré, lavage déséquilibré par excès ou par défaut", sera précisée ultérieurement.

remment "solides" ou "insolubles" (on dit aussi "inertes") - constituent la phase solide, tandis que la solution d'imprégnation forme la phase liquide.

Il convient de remarquer qu'une pulpe peut toujours se ramener à un mélange de trois constituants (ce qui, en particulier, permet sa représentation sur un diagramme triangulaire), à savoir : solides ou insolubles, soluté et solvant (ce dernier étant généralement de l'eau). En effet, si la solution d'imprégnation renferme plusieurs solutés on pourra, soit les considérer globalement sous la seule dénomination de "soluté" s'ils sont tous également intéressants à récupérer ou à éliminer, soit ne considérer que le soluté intéressant en faisant abstraction des autres. Dans ce dernier cas, nous appellerons "pulpe utile", la pulpe fictive dans laquelle n'intervient - en plus de l'insoluble et du solvant - que cet unique soluté. Sauf indication contraire, c'est exclusivement sur de telles "pulpes utiles" - lorsqu'elles ne se confondent pas avec les pulpes réelles - que nous raisonnerons dorénavant (le qualificatif "utile", s'il ne figure pas explicitement, étant toujours sous-entendu). Il faut cependant ne jamais perdre de vue l'existence dans la pulpe des autres solutés éventuels, qui peuvent évidemment influencer sur l'équilibre physico-chimique du système et notamment sur la solubilité du soluté considéré.

Le but poursuivi dans le lavage d'une pulpe sera, suivant les cas, soit de purifier les solides, soit de récupérer les solutés contenus dans la solution, soit d'effectuer les deux opérations simultanément.

De la description que nous avons faite du lavage des pulpes dans le cadre de l'industrie potassique, il ressort qu'il existe deux grandes sortes de lavages :

- Lavage par dilution ;
- Lavage par déplacement.

Dans le lavage par dilution, les pulpes épaissies sont, à l'entrée des divers étages, diluées avec les solutions de lavage correspondantes pour réaliser un mélange aussi parfait que possible, la séparation ultérieure solide-liquide se faisant habituellement par décantation. Un tel lavage convient aux pulpes boueuses formées de particules très finement divisées.

Dans le lavage par déplacement, la solution d'imprégnation de la pulpe à laver est chassée globalement par le liquide de lavage, qui se substitue directement à elle de manière plus ou moins complète. Ce genre de lavage n'est possible qu'avec des pulpes granuleuses perméables, grossièrement assimilables à un faisceau capillaire imprégné de la solution à extraire, la séparation solide-liquide étant ordinairement obtenue par filtration ou égouttage.

Qu'il soit par dilution ou par déplacement, le lavage d'une pulpe peut être effectué de deux façons principales :

- Lavage à courants croisés ou fractionné (le fractionnement ayant trait ici au liquide de lavage) ;
 - Lavage à contre-courant ou méthodique ;
- ces deux types de lavages étant évidemment confondus lorsqu'ils ne comportent qu'un seul étage.

Nous n'envisagerons ici que le lavage à contre-courant, plus efficace que le lavage à courants croisés et de beaucoup le plus important industriellement.

Le lavage des pulpes apparaît en définitive comme une opération particulière et originale qui participe à la fois de l'extraction et de la séparation solide-liquide, et qui entre dans la catégorie générale des opérations de transfert de matière du Génie Chimique. A ce titre, le problème du lavage présente des analogies de principe - plus ou moins étroites - avec les nombreux autres problèmes industriels où l'on a à fractionner des systèmes à trois constituants : diluant, soluté et solvant (dans le cas présent, ce sont les solides ou insolubles qui jouent le rôle de diluant). Nous citerons notamment comme opérations analogues au lavage des pulpes, d'après P. Le Goff (28) : l'adsorption gaz-solide, l'absorption gaz-liquide, la désorption solide-liquide, et surtout l'extraction liquide-liquide. Aussi, un certain nombre de formules algébriques ou de constructions graphiques relatives à ces opérations (de même qu'à la distillation ou à la rectification) sont-elles plus ou moins directement transposables au domaine du lavage des pulpes.

°
° °

Les méthodes utilisées pour la résolution des problèmes de lavage des pulpes - comme d'ailleurs des problèmes concernant les différentes opérations analogues énumérées ci-dessus - sont soit des méthodes algébriques (ou analytiques), soit des méthodes graphiques.

Pour ce qui est des méthodes algébriques ayant trait au lavage par dilution à contre-courant (lavage au solvant pur ou avec une solution), les premières études importantes sont fondées sur le concept d'étage "théorique" ou "idéal", c'est-à-dire qu'elles supposent que les solutions clarifiées et les solutions d'imprégnation des pulpes épaissies sortant d'un même étage ont la même composition. En admettant en outre que la quantité de solution ou de solvant associée aux solides dans les pulpes épaissies (y compris la pulpe d'alimentation) est la même à tous les étages, Turner (4) a établi pour le lavage des équations analogues à celles bien connues proposées par Kremser (5), puis par Sonders et Brown (6), pour l'absorption gaz-liquide. Baker (7) se place dans un cas plus compliqué en supposant que la quantité de solvant ou de solution associée aux solides dans les pulpes épaissies reste constante à tous les étages mais est différente pour la pulpe d'alimentation ; l'équation à laquelle il aboutit permet de calculer la teneur en soluté de la pulpe finale quand la quantité de liquide de lavage et le nombre d'étages sont connus. McCabe et Smith (23) en déduisent l'équation donnant le nombre d'étages nécessaire pour obtenir une pulpe finale de composition donnée. Chen (35) indique une équation analogue simplifiée. De nombreux autres articles d'auteurs américains ne sont en fait que des variantes des travaux publiés par les auteurs déjà cités, avec parfois une orientation plus technologique ou économique. La publication de Orel (16) (en français) constitue une étude assez poussée du lavage au solvant pur ; mais l'auteur se place également dans des cas très particuliers en ce qui concerne les épaississements des pulpes et d'autre part l'utilisation de ce qu'il appelle les "humidités réelles" rend les calculs lourds et les formules compliquées.

D'autres auteurs ont étudié le cas - plus conforme à la réalité - du lavage avec épaississements variables des pulpes d'un étage à l'autre. Coulson et Richardson (31) supposent que la quantité de solution ou de solvant associée aux solides dans les pulpes épaissies est fonction de la concentration en soluté de cette solution. Armstrong et Kammermeyer (10) pensent que la variation de la quantité de solution dans les pulpes est due à l'adsorption de soluté par les solides, ce qui paraît peu vraisemblable. La cause en est par contre, d'après Badger et McCabe (9), dans le

fait que la viscosité de la solution d'imprégnation croît en même temps que sa concentration en soluté, ce qui tend à gêner la sédimentation des solides. McCabe et Smith (23) estiment que si la densité et la viscosité de la solution changent de manière appréciable avec sa concentration en soluté, les solides doivent retenir plus de liquide dans les premiers étages que dans les derniers (+). Grosberg (14) admet la loi suivant laquelle l'inverse de la quantité de liquide de rétention (solution ou solvant) dans la pulpe est une fonction linéaire décroissante de la concentration en soluté (cette loi étant cependant mal vérifiée aux faibles concentrations). Chen (35) établit une expression analytique simplifiée pour déterminer le nombre d'étages théoriques dans la même hypothèse de linéarité que Grosberg ou en supposant que les données peuvent être scindées en plusieurs intervalles où elles restent linéaires.

Les publications relatives au lavage à épaissements variables des pulpes, dont nous venons de faire mention, appellent les remarques suivantes. Dans le cas du lavage isotherme d'une pulpe de nature donnée, avec un mode de séparation solide-liquide déterminé (décantation par exemple), on peut logiquement admettre que l'épaississement (considéré comme l'inverse de la quantité de solvant ou de solution d'imprégnation) diminue quand la concentration en soluté augmente. Mais la loi selon laquelle la variation de l'épaississement en fonction de la concentration serait linéaire, si elle a le mérite de la simplicité, ne repose en fait sur aucune base scientifique rigoureuse. D'ailleurs, des facteurs autres que la concentration - et notamment la température, dans le cas d'un lavage polytherme - peuvent intervenir de manière prépondérante. C'est ainsi que dans le cas du lavage des boues potassiques thermiques, les épaissements vont en décroissant, en même temps que la température, du premier au dernier étage.

Enfin, certains auteurs et notamment King (11), Ruth (12) et Grosberg (14) ont envisagé le cas où le temps de contact entre les pulpes et les solutions de lavage est trop court ou leur mélange insuffisant pour que les conditions d'équilibre soient atteintes (système à étages dits "non théoriques"). Mais les méthodes proposées pour résoudre un tel problème de lavage à homogénéisation incomplète sont d'une application difficile et par conséquent d'un usage peu fréquent.

En résumé, toutes les méthodes algébriques décrites pour le lavage par dilution, ou bien se limitent au cas de l' "équivalent-épaississement" des pulpes aux différents étages ou à des cas plus compliqués mais toujours particuliers, ou bien supposent que les épaissements sont liés à la concentration en soluté des solutions d'imprégnation par des lois simples mais souvent assez éloignées de la réalité et parfois même en pleine contradiction avec elle. Une notion aussi importante que celle de lavage "équilibré" (dans le sens que nous donnons à ce terme) est par ailleurs complètement passée sous silence.

Quant au lavage par déplacement, il est cité par McCabe et Smith (23) à propos du lavage des gâteaux de filtration. Mais l'analyse du processus de déplacement et des paramètres qui le conditionnent n'a fait l'objet d'aucune étude approfondie.

(+) Notons au passage que beaucoup d'auteurs utilisent pour le lavage à contre-courant un numérotage defectueux des étages en faisant croître les numéros dans le sens d'écoulement de la solution de lavage, alors qu'ils doivent normalement croître dans le sens d'écoulement de la pulpe, celui-ci ayant lieu, suivant la disposition du schéma, de gauche à droite ou de haut en bas.

En ce qui concerne les méthodes graphiques appliquées au lavage par dilution et signalées dans la littérature, nous ne retiendrons que les plus importantes. Une première méthode fait intervenir la représentation des pulpes, caractérisées par leurs "compositions" dans les trois constituants (solvant, soluté, insoluble), sur un diagramme triangulaire (-). Une deuxième méthode, dans laquelle on considère les "concentrations" en soluté des solutions clarifiées et des pulpes épaissies et qui est fondée sur l'utilisation conjointe de la courbe d'opération et de la droite de partage, est analogue à celle initialement préconisée par McCabe et Thiele (3) pour le calcul des colonnes de rectification. Une autre méthode, dite de Ponchon-Savarit (1, 2), transposée de celle mise au point par ces auteurs au sujet de la distillation, n'est en réalité qu'une variante de celle fondée sur l'emploi du diagramme triangulaire, tout en étant moins parlante à l'esprit du fait que les variables utilisées : soluté/(solvant + soluté) en abscisses et insoluble/(solvant + soluté) en ordonnées, n'ont pas une signification immédiate. Si l'on tient compte de ce que la méthode de McCabe et Thiele ne s'applique en pratique qu'au lavage à équi-épaississement (ce qui correspond, dans le cas de l'extraction liquide-liquide, à l'immiscibilité du solvant et du diluant, la courbe d'opération devenant la droite d'opération), il ne reste finalement, pour le lavage à épaississements quelconques, que la méthode du diagramme triangulaire.

Dans la méthode algébrique on détermine par le calcul, en fonction des paramètres du lavage (quantité de liquide de lavage utilisée, nombre d'étages de lavage, épaississements des pulpes aux différents étages), les caractéristiques des pulpes et solutions clarifiées successives, et en particulier celles de la pulpe finale et de la solution récupérée. Dans les méthodes graphiques au contraire, la loi des épaississements ou des compositions des pulpes successives étant connue, on se fixe a priori les caractéristiques de la pulpe finale et la quantité de liquide de lavage utilisée, et par suite les caractéristiques de la solution récupérée, et on en déduit le nombre d'étages nécessaire. En général, le nombre d'étages ainsi trouvé est tel qu'il lui correspond une pulpe finale un peu mieux épuisée et une solution récupérée un peu plus riche qu'il n'était prévu. En diminuant progressivement la quantité de liquide de lavage, on peut arriver à ce que, pour le nombre d'étages déterminé, la pulpe finale ait exactement les caractéristiques fixées. Alors la construction graphique indiquera, outre le nombre d'étages, et d'une manière très simple (avec toutefois l'imprécision inhérente à toute méthode graphique), les caractéristiques de toutes les pulpes épaissies et solutions clarifiées intermédiaires. Pour cette dernière détermination, les méthodes graphiques présentent donc ceci de commun que l'on opère par approximations successives.

La méthode algébrique et les méthodes graphiques reposent sur les mêmes hypothèses de départ et leurs domaines d'application sont par suite identiques. Les méthodes graphiques - qui visent essentiellement à la détermination du nombre d'étages d'une installation - sont ordinairement mal adaptées aux types de problèmes (tels que ceux énumérés à propos de l'industrie potassique) qui peuvent se poser lorsque l'objet du lavage est la récupération des solutés. La méthode algébrique se prête beaucoup mieux que les méthodes graphiques à une discussion générale, sur-

(+) On utilise généralement le diagramme à triangle rectangle de préférence au diagramme à triangle équilatéral, car il présente sur ce dernier l'avantage de ne pas exiger de papier à graduation spéciale et de permettre le choix, sur chacun des axes, d'une échelle appropriée au problème à résoudre.

tout dès que l'on aborde des cas un peu complexes. D'ailleurs, une étude algébrique doit habituellement précéder les méthodes graphiques si l'on veut comprendre ce que l'on fait et être en mesure d'interpréter ou de prévoir les différents cas de figures qui peuvent se rencontrer. Les méthodes graphiques constituent alors - indépendamment de l'intérêt intrinsèque qu'elles peuvent offrir - une illustration très expressive de la théorie algébrique.

L'étude que nous présentons comprend deux grandes parties, se rapportant respectivement au lavage par dilution et au lavage par déplacement.

En ce qui concerne le lavage par dilution, après quelques "Généralités" sur le lavage, nous exposons, en supposant l'homogénéisation complète des pulpes épaissies et des solutions de lavage à l'entrée des différents étages, une théorie algébrique générale du lavage à contre-courant dans le cas d'épaississements absolument quelconques des pulpes. Puis nous montrons comment, par l'introduction des "coefficients de dilution", cette théorie peut être étendue au cas de l'homogénéisation incomplète.

Nous passons ensuite en revue les principales méthodes graphiques qui (dans le cas de l'homogénéisation complète) peuvent être employées pour résoudre le problème du lavage, à savoir : la méthode utilisant les "compositions" sur le diagramme triangulaire ; une méthode originale fondée sur les "quantités de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence" (variables particulièrement bien adaptées aux problèmes de lavage) ; enfin, la méthode dite de McCabe et Thiele utilisant les "concentrations" en soluté des solutions clarifiées et des pulpes épaissies par l'intermédiaire des droites d'opération et de partage. Pour les deux premières méthodes nous avons fait usage du calcul vectoriel, précédemment employé par R. Berthon (32) pour l'étude des diagrammes de solubilités. Nous avons ainsi pu aisément déterminer les coordonnées et procéder à la discussion du lieu du "point Δ " qui intervient, pour le lavage à contre-courant, dans la méthode fondée sur la considération du diagramme triangulaire.

Pour ce qui est du lavage par déplacement, nous avons d'abord rattaché son étude algébrique à celle du lavage par dilution par l'introduction des "coefficients de déplacement". Nous avons ensuite, au cours d'un travail expérimental consacré à l'enrichissement d'un concentré de chlorure de potassium au moyen d'un lavage par déplacement, examiné au laboratoire l'influence des paramètres qui régissent un tel lavage, afin de connaître les résultats que l'on peut obtenir dans les meilleures conditions et en déduire le mode opératoire industriel le mieux approprié.

II - LAVAGE PAR DILUTION

(Lavage à contre-courant ou méthodique)

II - LAVAGE PAR DILUTION

(Lavage à contre-courant ou méthodique)

Sommaire

Un lavage par dilution est un lavage dans lequel les pulpes épaissies sont, à l'entrée des divers étages, diluées avec les solutions de lavage correspondantes pour réaliser un mélange aussi parfait que possible, la séparation ultérieure solide-liquide se faisant habituellement par décantation. Un tel lavage convient aux pulpes boueuses formées de particules très finement divisées.

Dans des Généralités, nous passons en revue les différents modes de caractérisation des pulpes, les paramètres qui conditionnent une opération de lavage et les hypothèses générales sur lesquelles reposent la théorie algébrique et les méthodes graphiques proposées pour le lavage par dilution.

En ce qui concerne la Théorie algébrique du lavage par dilution (lavage à contre-courant ou méthodique, dans lequel les solutions clarifiées d'extraction circulent en sens contraire de la pulpe à épuiser), nous supposons d'abord l'homogénéisation complète des pulpes épaissies et des solutions de lavage à l'entrée des différents étages. Dans cette hypothèse, en admettant des épaississements absolument quelconques des pulpes aux divers étages, nous examinons successivement les lavages "déséquilibré" et "équilibré" en donnant, dans chaque cas, les expressions des principales grandeurs caractéristiques du lavage (et notamment celles du rendement d'extraction et de la concentration relative de la solution récupérée). Nous signalons au passage l'intérêt particulier du lavage à contre-courant équilibré, seul type de lavage par dilution qui, moyennant un nombre élevé d'étages, puisse permettre d'envisager la récupération quasi intégrale de la solution d'imprégnation de la pulpe initiale à la fois en quantité et qualité. De l'étude du lavage à épaississements quelconques nous déduisons facilement, comme cas particuliers, les formules connues correspondant aux lavages à équi-épaississement déséquilibré et équilibré. Nous envisageons d'autre part le cas où une partie du soluté est à l'état solide ou indissous dans la pulpe initiale et disons un mot des lavages polythermes. Dans une dernière partie, nous traitons du lavage à homogénéisation incomplète (dilution imparfaite) et montrons comment, par l'introduction des "coefficients de dilution" exprimant le degré d'homogénéité des mélanges à l'entrée des différents étages, son étude peut se ramener à celle du lavage à homogénéisation complète. Enfin, des exemples numériques de lavage méthodique par dilution sont traités dans les deux cas de l'homogénéisation complète et de l'homogénéisation incomplète, comme illustration de la théorie proposée.

Pour ce qui est des Méthodes graphiques applicables, dans le cas de l'homogénéisation complète, au lavage par dilution (lavage à contre-courant) nous décrivons : la méthode utilisant les "compositions" sur le diagramme triangulaire ; une méthode

originale fondée sur les "quantités de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence" (variables particulièrement bien adaptées aux problèmes de lavage) ; enfin, la méthode dite de McCabe et Thiele utilisant les "concentrations" en soluté des solutions clarifiées et des pulpes épaissies par l'intermédiaire des droites d'opération et de partage. Nous indiquons chaque fois comment se traduisent graphiquement les divers cas de lavage que l'on peut envisager (lavages à épaississements quelconques ou à équi-épaississement, déséquilibré par excès ou par défaut, équilibré). L'emploi du calcul vectoriel nous permet aisément de déterminer les coordonnées et de procéder à la discussion du lieu du "point Δ " qui intervient, pour le lavage à contre-courant, dans la méthode fondée sur la considération du diagramme triangulaire.

°
° °

A - GENERALITES

Etant donnée une pulpe P formée de trois constituants : solvant, soluté et insoluble, nous pouvons caractériser cette pulpe de diverses manières.

En ce qui concerne la théorie algébrique du lavage, l'insoluble étant tout au long de l'opération une quantité invariante, il paraît logique de prendre cet insoluble comme élément de référence pour définir l'état de la pulpe aux différents stades de son traitement, c'est-à-dire de rapporter les diverses grandeurs considérées à une masse fixe (i) d'insoluble (en pratique, la masse (i) de référence sera l'unité de masse, ce qu'implicitement nous supposons toujours).

En conséquence, nous caractériserons la phase liquide de la pulpe P par la "dilution" (a_P) de cette pulpe, cette dilution représentant soit le volume de solution, soit la masse de solution, soit enfin la masse de solvant, associés à l'unité de masse d'insoluble. La teneur en soluté de la phase liquide sera évaluée par sa "concentration" (β_P) exprimée, suivant les cas, en masse de soluté par unité de volume ou de masse de solution ou par unité de masse de solvant. Par suite, la masse de soluté (b_P) contenue dans la pulpe par unité de masse d'insoluble sera donnée dans tous les cas par la relation unique :

$$b_P = a_P \beta_P \quad (1)$$

Il en résulte que la pulpe P pourra aussi bien être caractérisée par les grandeurs (a_P, β_P) que par les quantités (a_P, b_P).

Enfin, nous conviendrons de considérer comme la concentration de la pulpe en insoluble, ou mieux, comme son degré d'épaississement (+), l'inverse de la dilution :

$$c_P = 1/a_P \quad (2)$$

c'est-à-dire, suivant les cas, la masse d'insoluble par unité de volume ou de masse de solution ou par unité de masse de solvant.

Le fait d'adapter chaque fois le mode d'expression de la concentration en soluté au mode de caractérisation de la phase liquide de la pulpe nous permettra d'obtenir, dans nos calculs de lavage, des relations générales applicables à chaque cas sans modification. Toutefois, comme nous serons amenés à faire non seulement des bilans de solutés mais aussi de liquides, il est indispensable, pour que les relations

(+) Afin d'éviter toute confusion, nous emploierons désormais exclusivement le terme de "concentration" quand il s'agira du soluté et celui d' "épaississement" lorsqu'il sera question de l'insoluble (les pulpes qui interviennent dans les opérations de lavage étant effectivement des pulpes épaissies à teneur en insoluble élevée).

obtenues soient encore valables dans le cas des volumes, d'introduire quelques hypothèses simplificatrices. Il faut admettre que les volumes restent additifs tout comme le sont les masses, c'est-à-dire que le mélange de deux solutions à des concentrations différentes en solutés se fait sans variation de volume, et supposer également négligeables, dans le cas d'un lavage polytherme, les changements de volume consécutifs aux variations de température (en pratique, on peut effectivement presque toujours négliger ces variations de volume, bien qu'elles ne soient pas rigoureusement nulles).

Le raisonnement sur les volumes de solution est celui qui vient le plus naturellement à l'esprit, parce qu'il est le plus concret et qu'il est lié directement aux caractéristiques géométriques des appareils et à la façon habituelle d'évaluer les débits de liquides. D'autre part, il est spécialement bien adapté au lavage par déplacement, dans lequel les substitutions idéales des solutions de lavage aux solutions d'imprégnation des pulpes se font naturellement volume à volume. Le raisonnement sur les masses de solution est peut-être moins immédiat que celui sur les volumes de solution, mais il offre l'intérêt de ne pas entraîner de difficultés en ce qui concerne l'additivité et l'invariabilité des grandeurs considérées. Quant au raisonnement sur les masses de solvant, il est assurément plus abstrait que les deux autres, car la quantité de solvant n'est qu'une fraction de la phase liquide, non directement perceptible (bien que d'une détermination généralement aisée). Mais il présente par ailleurs, au point de vue théorique, un certain nombre d'avantages, notamment du fait que le solvant est, conjointement avec le soluté et l'insoluble, un des constituants fondamentaux de la pulpe, et un "invariant" au cours des différentes opérations de dissolution et de cristallisation qui peuvent avoir lieu. De plus, il convient particulièrement bien lorsqu'une partie du soluté est à l'état solide dans la pulpe initiale, auquel cas il est commode de considérer une concentration fictive globale égale à la masse totale de soluté (dissous et indissous) par unité de masse de solvant. En définitive, tout au moins dans les lavages par dilution, il apparaît théoriquement préférable de raisonner sur les masses de solvant. C'est du reste ce que nous avons fait dans les exemples numériques traités comme illustration de la théorie algébrique.

Si a_P désigne maintenant strictement la quantité de solvant associée dans la pulpe P à la masse (i) d'insoluble, b_P étant toujours la masse de soluté correspondante, on a comme expression des "compositions" (appelées encore titres massiques ou fractions massiques) respectivement en solvant, soluté et insoluble :

$$x_P = \frac{a_P}{a_P + b_P + i} \quad , \quad y_P = \frac{b_P}{a_P + b_P + i} \quad , \quad z_P = \frac{i}{a_P + b_P + i} \quad (3)$$

Inversement, connaissant les compositions : x_P en solvant, y_P en soluté, z_P en insoluble, d'une pulpe P , on en déduit aisément par le calcul les quantités a_P de solvant et b_P de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence :

$$a_P = \frac{x_P \cdot i}{z_P} \quad , \quad b_P = \frac{y_P \cdot i}{z_P} \quad (4)$$

Les compositions (x_P, y_P, z_P) et les quantités a_P et b_P de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence (de même d'ailleurs que les concentrations β_P) interviennent dans les méthodes graphiques de résolution des problèmes de lavage.

Le lavage d'une pulpe est conditionné par trois paramètres, à savoir (+) :

- la quantité L de liquide de lavage utilisée ;
- le nombre n d'étages de lavage ;
- les épaisissements c_i (ou les dilutions a_i) des pulpes aux différents étages (y compris l'épaississement de la pulpe initiale).

Il est à remarquer que contrairement aux deux premiers paramètres (++), que l'on peut se fixer a priori, la détermination des épaisissements n'est possible qu'expérimentalement (tout au moins si l'on considère, à chaque étage, l'épaississement maximal compatible avec les données opératoires) (+++). Ces épaisissements, qui traduisent en quelque sorte l'efficacité des divers étages du dispositif, dépendent à la fois de la nature des pulpes soumises au lavage (composition chimique, granulométrie, etc.), de leurs conditions de traitement (température, débit, etc.) et du mode de séparation solide-liquide adopté (décantation, filtration, centrifugation, etc.).

Nous supposerons toujours réalisées, au cours de notre étude, les conditions générales suivantes :

- les solides autres que les solutés sont parfaitement insolubles dans les différentes liqueurs de lavage ;
- les solutions clarifiées obtenues aux effluents des divers étages ne contiennent pas de matières solides ;
- le soluté n'est pas adsorbé par les insolubles ;
- les installations sont dans un état de régime permanent idéal.

La décantation constituant le mode de séparation solide-liquide le plus fréquemment utilisé dans les lavages par dilution, nous admettrons implicitement que les différentes séparations en pulpes épaissies et solutions clarifiées sont effectuées à chaque étage par décantation, dans des appareils que nous désignerons indifféremment sous les noms de décanteurs ou de laveurs.

Lorsqu'on a en vue la seule purification des solides de la pulpe, c'est-à-dire quand les solutés n'ont pas de valeur, le problème du lavage ne présente ordinairement pas de difficultés. En général, on se propose uniquement d'amener à une valeur donnée, la teneur en soluté de la pulpe lavée. Il en résulte que l'on peut alors utiliser pour le lavage une grande quantité de solvant.

Il en va autrement lorsque c'est la solution d'imprégnation de la pulpe qui constitue l'élément intéressant, c'est-à-dire quand on vise la récupération du ou des solutés. Dans ce cas en effet, outre un certain rendement quantitatif en soluté à extraire, on se fixe souvent en même temps certaines conditions quant au volume de solution récupérée ou à la concentration en soluté de celle-ci, ce qui limite automatiquement la quantité de liquide de lavage disponible.

(+) On verra que dans le cas le plus général, on peut considérer comme un quatrième paramètre du lavage (de nature expérimentale, comme les épaisissements) les coefficients de dilution (cas du lavage par dilution à homogénéisation incomplète) ou de déplacement (cas du lavage par déplacement) aux différents étages.

(++) Le paramètre n présente, comparativement aux deux autres, la particularité de ne pouvoir évidemment prendre que des valeurs entières.

(+++ Il est certes toujours possible de se donner a priori des lois d'épaississement des pulpes aux divers étages du lavage, pouvant correspondre, avec une plus ou moins bonne approximation, à des systèmes physiques déterminés.

Bien que la théorie du lavage soit la même, que le but poursuivi soit la purification des solides ou la récupération des constituants de la solution, nous supposerons tacitement, et sauf spécification contraire, que nous sommes dans le second cas. Des deux opérations, la récupération de solutés est en effet celle dans laquelle on rencontre le plus de sujétions et qui présente par ailleurs le plus d'intérêt en pratique.

°
° °

B - THEORIE ALGEBRIQUE

1) CAS DE L'HOMOGENEISATION COMPLETE

Sauf spécification contraire, nous supposerons que la totalité du soluté à extraire est à l'état de solution - saturée ou non - dans la pulpe initiale. Nous supposons en outre que les lavages sont isothermes, c'est-à-dire que les températures des pulpes sont les mêmes à tous les étages. Cette dernière limitation résulte du fait que les solubilités sont presque toujours fonctions de la température et que nos calculs supposent que la totalité du soluté à extraire est à l'état dissous non seulement dans la pulpe initiale mais aussi dans les pulpes de tous les étages subséquents. Un lavage polytherme pour lequel il en est ainsi se ramène d'ailleurs, à cet égard, à un lavage isotherme (+).

Nous admettons de plus ici que l'on réalise à l'entrée des différents étages (au besoin à l'aide d'un dispositif spécial d'agitation ou de repulpage) une homogénéisation complète des pulpes épaissies et des solutions de lavage. En conséquence, les solutions clarifiées ou effluents et les solutions d'imprégnation des pulpes épaissies sortant d'un même étage de rang p seront à une même concentration uniforme β_p (les étages étant alors dits "théoriques").

°
° °

a) Lavage à épaississements quelconques

Le schéma du dispositif de lavage méthodique à n étages à épaississements quelconques est représenté sur la figure 1 (++)).

Nous supposons réalisé un régime permanent idéal, c'est-à-dire une alimentation constante en quantité et qualité et un fonctionnement toujours identique de chacun des décanteurs-laveurs pris séparément. Il en résulte que dans le même temps un laveur donné reçoit et restitue des quantités égales d'insoluble, de solvant et de soluté.

(+) Le cas où une partie du soluté est à l'état solide dans la pulpe initiale et celui des lavages polythermes seront examinés dans un chapitre distinct.

(++) Pour la commodité de l'exposé, nous admettrons qu'il n'y a qu'un décanteur-laveur par étage de lavage.

LAVAGE A CONTRE-COURANT OU METHODIQUE

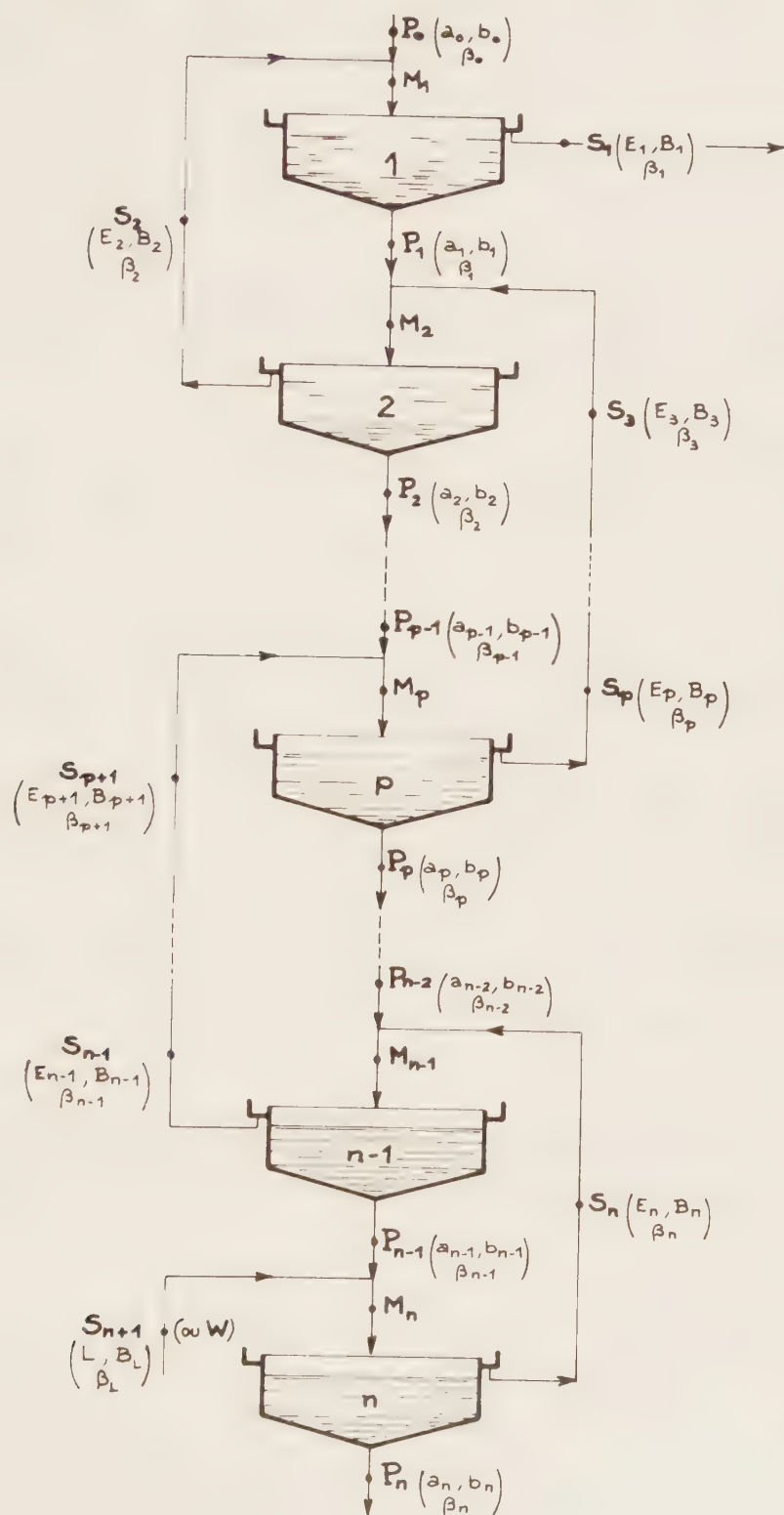


Fig. 1

La pulpe initiale ou pulpe d'alimentation (a_0, β_0) pénètre dans le premier laveur, dont l'effluent constitue la solution récupérée, tandis que la pulpe finale (encore appelée pulpe lavée ou pulpe résiduelle) est évacuée à la partie inférieure du n ième et dernier laveur, à l'entrée duquel est introduit le liquide de lavage. Celui-ci est, dans le cas général, constitué par une solution de concentration en soluté β_L (avec $\beta_L < \beta_0$) et en quantité L par unité de masse d'insoluble.

D'une manière générale, il entre dans un décanteur-laveur quelconque de rang p :

1°) Une pulpe épaissie provenant du $(p-1)$ ième laveur, caractérisée par sa dilution a_{p-1} et la concentration β_{p-1} de sa solution d'imprégnation en soluté à récupérer ou éliminer ;

2°) Une solution de lavage provenant du $(p+1)$ ième laveur qui apporte, par unité de masse d'insoluble, une quantité de liquide caractérisée comme la solution d'imprégnation de la pulpe, c'est-à-dire par son volume, sa masse ou sa quantité de solvant, et représentée par le symbole E_{p+1} , la concentration en soluté de cette solution étant β_{p+1} .

Nous admettons, suivant l'hypothèse déjà énoncée, que la pulpe épaissie provenant du $(p-1)$ ième laveur et la solution de lavage provenant du $(p+1)$ ième laveur sont parfaitement mélangées, en continu, avant de pénétrer dans le p ième laveur.

Il sort du même décanteur-laveur de rang p :

1°) Une pulpe épaissie caractérisée par sa dilution a_p et la concentration en soluté β_p de sa solution d'imprégnation ;

2°) Une solution clarifiée (ou effluent) qui, par unité de masse d'insoluble, représente une quantité E_p de liquide ou de solvant, suivant le mode utilisé pour caractériser les dilutions, et qui est à la même concentration β_p que la solution d'imprégnation de la pulpe épaissie qui quitte le décanteur.

On voit que les diverses solutions clarifiées - qui peuvent être considérées à la fois comme des solutions de lavage et des solutions récupérées (ou extraits) intermédiaires - circulent à travers les différents étages à contre-courant de la pulpe à épuiser.

Les quantités de soluté qui, par unité de masse d'insoluble, sortent d'un laveur quelconque de rang p avec la pulpe épaissie et la solution clarifiée sont respectivement :

$$b_p = a_p \beta_p \quad \text{et} \quad B_p = E_p \beta_p \quad (5)$$

Relations entre les différentes quantités caractérisant l'opération de lavage.

Les équations de conservation de la phase liquide, pour l'unité de masse d'insoluble, s'écrivent :

$$\left. \begin{array}{rcl} a_0 + E_2 & = & a_1 + E_1 \\ a_1 + E_3 & = & a_2 + E_2 \\ \dots\dots\dots & & \dots\dots\dots \\ a_{p-1} + E_{p+1} & = & a_p + E_p \\ \dots\dots\dots & & \dots\dots\dots \\ a_{n-2} + E_n & = & a_{n-1} + E_{n-1} \\ a_{n-1} + L & = & a_n + E_n \end{array} \right\} \quad (6)$$

En additionnant membre à membre les n équations du système (6) on obtient, après les simplifications évidentes, l'équation globale :

$$a_0 + L = a_n + E_1 \quad (7)$$

Les équations (6) et (7) expriment simplement que pour chaque étage pris isolément, de même que pour l'ensemble du dispositif, la quantité de liquide qui entre sous forme de solution d'imprégnation de la pulpe à laver et de solution de lavage est égale à celle qui sort sous forme de solution d'imprégnation de la pulpe lavée et de solution récupérée.

On tire de l'équation (7) :

$$E_1 = a_0 + (L - a_n) \quad (8)$$

ou :

$$E_1 = a_0 + \varepsilon \quad (9)$$

en posant :

$$\varepsilon = L - a_n \quad (10)$$

L'équation (8) indique que la quantité E_1 de solution récupérée à l'effluent du premier laveur ne dépend que de la quantité L de liquide de lavage utilisée et des dilutions initiale (a_0) et finale (a_n) de la pulpe soumise au lavage (lesquelles dilutions joueront de ce fait dans le lavage, par rapport aux dilutions a_p des étages intermédiaires, un rôle particulier). Lorsque $a_n = a_0$, on a $E_1 = L$.

Quant à la quantité ε , que nous appellerons "déséquilibre" du lavage, elle représente, par unité de masse d'insoluble, la différence entre la quantité L de liquide de lavage ajoutée dans le dernier laveur et la quantité a_n correspondante (volume de solution, masse de solution ou masse de solvant) retirée du système sous forme de solution d'imprégnation de la pulpe finale. Quand $\varepsilon = 0$, c'est-à-dire $L = a_n$, on a $E_1 = a_0$: la solution récupérée à l'effluent du premier laveur est équivalente en volume, masse ou quantité de solvant à celle qui imprègne la pulpe initiale ; le lavage est alors dit équilibré. Si $\varepsilon > 0$ ou $L > a_n$, on aura $E_1 > a_0$ et le lavage sera dit "déséquilibré par excès" ; si $\varepsilon < 0$ ou $L < a_n$, on aura $E_1 < a_0$ et le lavage sera dit "déséquilibré par défaut" (+).

Lorsque L varie de zéro à l'infini, ε varie de $(-a_n)$ à l'infini et E_1 de $(a_0 - a_n)$ à l'infini.

L'équation (9) montre que pour une pulpe initiale (a_0, β_0) donnée, un lavage à déséquilibre ε constant est aussi un lavage à effluent E_1 constant.

En mettant la relation (10) sous la forme équivalente :

$$L = a_n + \varepsilon \quad (11)$$

on voit que la quantité L de liquide de lavage à introduire par unité de masse d'insoluble dans le dernier laveur est la somme algébrique de la quantité a_n de liquide emportée par la pulpe lavée (fonction de l'épaississement de cette dernière) et de la quantité ε de liquide que l'on désire récupérer en excès ou en défaut de celle a_0 contenue dans la pulpe initiale.

(+) Il convient de noter que nous donnons aux termes "équilibre" et "déséquilibre" un sens différent de celui ordinairement adopté en Génie Chimique qui, lui, a trait à l'état du système vis-à-vis des concentrations-limites des phases en présence.

Si maintenant on considère seulement les $(n-p+1)$ dernières équations du système (6) on obtient, par addition membre à membre, la relation générale :

$$a_{p-1} + L = a_n + E_p \quad (12)$$

d'où :

$$E_p = a_{p-1} + (L - a_n) \quad (13)$$

ou :

$$E_p = a_{p-1} + \varepsilon \quad (14)$$

cette dernière équation redonnant bien, quand on fait $p=1$ et $p=n+1$ (en remarquant que $E_{n+1} \equiv L$), respectivement les relations (9) et (11).

L'importante équation (14) nous montre que les effluents s'expriment de façon très simple en fonction des dilutions des pulpes et du déséquilibre ε du lavage (+). Elle exprime que la quantité de liquide qui passe à l'effluent d'un décanteur-laveur restitue la quantité de liquide introduite dans ce décanteur par la pulpe à laver, augmentée (ou diminuée) d'une quantité constante qui caractérise les conditions choisies pour le lavage : équilibré ($\varepsilon=0$), déséquilibré par excès ($\varepsilon > 0$), déséquilibré par défaut ($\varepsilon < 0$).

Le résultat que nous venons de formuler peut être présenté d'une manière légèrement différente, en groupant les équations (9), (14) et (11) sous la forme condensée :

$$\varepsilon = E_1 - a_0 = \dots = E_p - a_{p-1} = \dots = L - a_n \quad (15)$$

que l'on pourrait d'ailleurs obtenir directement (en se rappelant que $E_{n+1} \equiv L$), par explicitation de la relation :

$$E_p - a_{p-1} = E_{p+1} - a_p \quad (16)$$

déduite de l'équation générale de conservation de la phase liquide pour le laveur de rang p , tirée du système (6).

Ainsi écrites, les équations (15) indiquent que la différence entre la quantité de liquide qui sort à l'effluent d'un décanteur-laveur et celle qui entre dans ce même décanteur avec la pulpe à laver, est une constante indépendante du rang de celui-ci et égale au déséquilibre ε du lavage.

On peut dire également que le "déséquilibre" d'un lavage représente le flux net de solution ou de solvant, compté positivement dans le sens contraire au sens d'écoulement de la pulpe. Un lavage "équilibré" est un lavage à flux net de solution ou de solvant nul.

°
° °

On déduit de la conservation du soluté, pour l'unité de masse d'insoluble, le nouveau système d'équations :

(+) On a évidemment $E_p = a_{p-1}$ dans le cas du lavage équilibré.

$$\begin{array}{rcl}
 a_0\beta_0 + E_1\beta_1 & = & (a_1 + E_1)\beta_1 \\
 a_1\beta_1 + E_2\beta_2 & = & (a_2 + E_2)\beta_2 \\
 \dots\dots\dots & & \dots\dots\dots \\
 a_{p-1}\beta_{p-1} + E_p\beta_p & = & (a_p + E_p)\beta_p \\
 \dots\dots\dots & & \dots\dots\dots \\
 a_{n-2}\beta_{n-2} + E_n\beta_n & = & (a_{n-1} + E_{n-1})\beta_{n-1} \\
 a_{n-1}\beta_{n-1} + L\beta_L & = & (a_n + E_n)\beta_n
 \end{array} \quad (17)$$

En additionnant membre à membre les équations de ce système on obtient, après les simplifications évidentes, l'équation globale :

$$a_0\beta_0 + L\beta_L = a_n\beta_n + E_1\beta_1 \quad (18)$$

ou :

$$b_0 + B_L = b_n + B_1 \quad (19)$$

Les différentes équations écrites expriment simplement que pour chaque étage pris isolément, de même que pour l'ensemble du dispositif, la quantité de soluté qui entre avec la pulpe à laver et la solution de lavage est égale à celle qui sort avec la pulpe lavée et la solution récupérée.

En explicitant l'équation générale de conservation du soluté tirée du système (17), écrite sous la forme :

$$a_{p-1}\beta_{p-1} - E_p\beta_p = a_p\beta_p - E_{p+1}\beta_{p+1} \quad (20)$$

on obtient (en observant que $\beta_{n+1} \equiv \beta_L$)

$$\begin{array}{l}
 F = a_0\beta_0 - E_1\beta_1 = \dots = a_{p-1}\beta_{p-1} - E_p\beta_p = \dots = a_n\beta_n - L\beta_L \\
 = b_0 - B_1 = \dots = b_{p-1} - B_p = \dots = b_n - B_L
 \end{array} \quad (21)$$

d'où la relation :

$$B_p = b_{p-1} - F \quad (22)$$

Le flux F représente la différence constante entre la quantité de soluté qui, par unité de masse d'insoluble, pénètre dans un laveur quelconque avec la pulpe à laver et celle qui en sort avec la solution clarifiée ou effluent de ce même laveur.

Dans le cas général où $\beta_L \neq 0$ (lavage avec une solution) le flux F peut, suivant les conditions, être positif, nul ou même négatif, et ceci pour un nombre fini d'étages. Ces trois éventualités signifient respectivement que la quantité totale $E_1\beta_1$ de soluté récupérée est inférieure, égale ou supérieure à la quantité $a_0\beta_0$ de soluté contenue dans la pulpe initiale.

L'éventualité $F \leq 0$ ne peut évidemment être réalisée - puisque $\beta_1 < \beta_0$ et $\beta_n > \beta_L$, comme nous le verrons plus loin - que si $E_1 > a_0$ ou $L > a_n$, c'est-à-dire si $\varepsilon > 0$ (lavage déséquilibré par excès). Dans ces conditions, elle aura d'autant plus de chances de se produire que d'une part le lavage sera plus parfait (c'est-à-dire que la quantité L de solution de lavage utilisée, le nombre n d'étages et les épaisissements c_j des pulpes aux différents étages, seront plus élevés) et que d'autre part la concentration β_L de la solution de lavage sera plus forte. Par suite, si $\varepsilon \leq 0$ (lavage déséquilibré par défaut ou équilibré), on a obligatoirement $F > 0$.

On a donc en définitive, dans le cas présent :

$$-\infty < F < b_0$$

F devenant infini négatif quand le déséquilibre ε du lavage devient infini positif.

Dans le cas où $\beta_L = 0$ (lavage au solvant pur), le flux net de soluté se réduit (avec $\mathcal{F} > F$) au flux du soluté perdu :

$$\mathcal{F} = a_n \beta_n = b_n \quad (23)$$

et il est alors évidemment toujours positif et décroît à mesure que le lavage s'améliore. Il devient nul lorsque $\beta_n = 0$, c'est-à-dire quand le rendement de lavage est égal à l'unité (ainsi que nous le verrons par la suite, ceci ne peut se produire que pour un lavage équilibré ou déséquilibré par excès, d'un nombre infini d'étages).

On a donc toujours ici :

$$0 < \mathcal{F} < b_0$$

Le déséquilibre (ε) (et plus spécialement le déséquilibre par rapport au solvant), le flux net de soluté (F) et la quantité d'insoluble (i) prise comme référence, constituent les trois invariants fondamentaux du système de lavage. D'après nos conventions de signes, ε est compté positivement dans le sens contraire au sens d'écoulement de la pulpe, tandis que F et i sont comptés positivement dans le sens d'écoulement de la pulpe.

°
° °

Nous nous proposons maintenant de calculer les concentrations inconnues $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ (et en particulier les concentrations β_1 de la solution récupérée et β_n de la solution d'imprégnation de la pulpe finale) en fonction des concentrations β_0 et β_L et des paramètres du lavage.

Les effluents E_i pouvant être exprimés en fonction des dilutions a_{i-1} et du déséquilibre ε du lavage, au moyen de la relation (14), le système (17) est bien un système de n équations linéaires à n inconnues.

Ce système d'équations peut se résoudre par la méthode des déterminants ou en faisant appel aux techniques du calcul matriciel. Mais il est plus simple d'opérer de la manière ci-après, en distinguant le cas du lavage déséquilibré de celui du lavage équilibré.

1°) Lavage déséquilibré ($\varepsilon \neq 0$) .

Nous allons introduire une variable auxiliaire (k_p) égale au rapport de la quantité E_p de solution ou de solvant qui passe à l'effluent d'un décanteur-laveur de rang p, à la quantité a_{p-1} de solution ou de solvant qui est introduite dans le même laveur par la pulpe à laver provenant du (p - 1) ième laveur :

$$k_p = \frac{E_p}{a_{p-1}} \quad (24)$$

ou, en tenant compte de la relation (14) :

$$k_p = \frac{a_{p-1} + \varepsilon}{a_{p-1}} = 1 + \frac{\varepsilon}{a_{p-1}} = 1 + \varepsilon \cdot c_{p-1} \quad (25)$$

avec (puisque $E_{n+1} \equiv L$) :

$$k_{n+1} = \frac{L}{a_n} = \frac{E_{n+1}}{a_n} = 1 + \frac{\varepsilon}{a_n} = 1 + \varepsilon \cdot c_n \quad (26)$$

En combinant l'équation (35) avec celle que l'on peut tirer du système (21) :

$$a_0\beta_0 - E_1\beta_1 = a_n\beta_n - L\beta_L \quad (36)$$

on obtient facilement (en remarquant que $E_1 - a_0 = L - a_n$) :

$$\beta_1 = \frac{k_2 \dots k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \beta_0 + \frac{(k_1 - 1) k_2 \dots k_{n+1}}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \beta_L \quad (37)$$

et :

$$\beta_n = \frac{k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \beta_0 + \frac{(k_1 \cdot k_2 \dots k_n - 1) k_{n+1}}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \beta_L \quad (38)$$

Si maintenant on considère seulement les $(n - p + 1)$ dernières équations du système (33) , on en déduit par multiplication membre à membre et après simplifications :

$$a_{p-1} \cdot a_p \dots a_{n-1} (\beta_{p-1} - \beta_p) = E_{p+1} \dots E_{n+1} (\beta_n - \beta_L) \quad (39)$$

En divisant les deux membres de l'équation (39) par $a_{p-1} \cdot a_p \dots a_n$, on a alors :

$$\frac{1}{a_n} (\beta_{p-1} - \beta_p) = \frac{1}{a_{p-1}} \cdot k_{p+1} \dots k_{n+1} (\beta_n - \beta_L) \quad (40)$$

En combinant l'équation (40) avec celle que l'on peut tirer du système (21) :

$$a_{p-1}\beta_{p-1} - E_p\beta_p = a_n\beta_n - L\beta_L \quad (41)$$

on trouve (en remarquant que $E_p - a_{p-1} = L - a_n$) l'expression de β_p en fonction de β_n , et par suite en fonction de β_0 et de β_L :

$$\left. \begin{aligned} \beta_p &= \frac{k_{p+1} \dots k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \beta_0 + \frac{(k_1 \cdot k_2 \dots k_p - 1) k_{p+1} \dots k_{n+1}}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \beta_L \\ &= \frac{k_{p+1} \dots k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \beta_0 + \left[1 - \frac{k_{p+1} \dots k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \right] \beta_L \\ &= \frac{k_{p+1} \dots k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} (\beta_0 - \beta_L) + \beta_L \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Lorsque $n \longrightarrow \infty$:

$$\underline{\varepsilon \geq 0} . \quad \beta_1 \longrightarrow (1/k_1) \cdot \beta_0 + (1 - 1/k_1) \cdot \beta_L \quad ; \quad \beta_n \longrightarrow \beta_L$$

$$\underline{\varepsilon \leq 0} . \quad \beta_1 \longrightarrow \beta_0 \quad ; \quad \beta_n \longrightarrow (1 - k_{n+1}) \cdot \beta_0 + k_{n+1} \cdot \beta_L$$

2°) Lavage équilibré ($\varepsilon = 0$) .

Quand $\varepsilon = 0$, tous les k_i sont égaux à l'unité et les expressions (42) prennent des formes indéterminées. D'autre part, du fait qu'alors $E_{i+1} = a_i$, l'équation (34) se réduit à :

$$a_0(\beta_0 - \beta_1) = a_n(\beta_n - \beta_L) \quad (43)$$

et les équations (36) et (43) deviennent équivalentes. Il faut donc procéder différemment.

L'équation ci-après, tirée du système (21) :

$$a_p \beta_p - E_{p+1} \beta_{p+1} = a_0 \beta_0 - E_1 \beta_1 \quad (44)$$

s'écrit dans le cas présent :

$$a_p (\beta_p - \beta_{p+1}) = a_0 (\beta_0 - \beta_1) \quad (45)$$

d'où :

$$\beta_p = \beta_{p+1} + \frac{a_0}{a_p} (\beta_0 - \beta_1) \quad (46)$$

En introduisant les épaissements :

$$c_i = 1/a_i \quad (47)$$

on obtient :

$$\beta_p = \beta_{p+1} + (\beta_0 - \beta_1) c_p / c_0 \quad (48)$$

En explicitant l'équation (48) on a alors :

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \beta_2 + (\beta_0 - \beta_1) c_1 / c_0 \\ \beta_2 &= \beta_3 + (\beta_0 - \beta_1) c_2 / c_0 \\ &\dots\dots\dots \\ \beta_p &= \beta_{p+1} + (\beta_0 - \beta_1) c_p / c_0 \\ &\dots\dots\dots \\ \beta_{n-1} &= \beta_n + (\beta_0 - \beta_1) c_{n-1} / c_0 \\ \beta_n &= \beta_L + (\beta_0 - \beta_1) c_n / c_0 \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

En additionnant membre à membre les équations du système (49) et en simplifiant, on obtient la relation :

$$\beta_1 = \beta_L + (\beta_0 - \beta_1) (c_1 + c_2 + \dots + c_n) / c_0 \quad (50)$$

de laquelle on tire :

$$\beta_1 = \frac{c_1 + \dots + c_n}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \beta_0 + \frac{c_0}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \beta_L \quad (51)$$

d'où, par l'intermédiaire de l'équation (43) :

$$\beta_n = \frac{c_n}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \beta_0 + \frac{c_0 + c_1 + \dots + c_{n-1}}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \beta_L \quad (52)$$

Si maintenant on considère seulement les $(n - p + 1)$ dernières équations du système (49), on en déduit par addition membre à membre et après simplifications :

$$\beta_p = \beta_L + (\beta_0 - \beta_1) (c_p + \dots + c_n) / c_0 \quad (53)$$

d'où, par l'intermédiaire de l'équation (51) :

$$\left. \begin{aligned} \beta_p &= \frac{c_p + \dots + c_n}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \beta_0 + \frac{c_0 + c_1 + \dots + c_{p-1}}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \beta_L \\ &= \frac{c_p + \dots + c_n}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \beta_0 + \left[1 - \frac{c_p + \dots + c_n}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \right] \beta_L \\ &= \frac{c_p + \dots + c_n}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} (\beta_0 - \beta_L) + \beta_L \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

Lorsque $n \longrightarrow \infty$:

$$\begin{array}{ccc} \beta_1 & \longrightarrow & \beta_0 \\ & \circ & \\ & \circ & \end{array} , \quad \begin{array}{ccc} \beta_n & \longrightarrow & \beta_L \\ & \circ & \\ & \circ & \end{array}$$

On voit qu'en posant, pour le lavage déséquilibré :

$$K_p = \frac{k_{p+1} \dots k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \quad (55)$$

et pour le lavage équilibré :

$$K_p = \frac{c_p + \dots + c_n}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \quad (56)$$

on a comme expression générale de la concentration β_p à l'étage de rang p :

$$\begin{aligned} \beta_p &= K_p \cdot \beta_0 + (1 - K_p) \beta_L \\ &= K_p (\beta_0 - \beta_L) + \beta_L \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \beta_p &= K_p \cdot \beta_0 + (1 - K_p) \beta_L \\ &= K_p (\beta_0 - \beta_L) + \beta_L \end{aligned}} \right\} \quad (57)$$

et il apparaît, d'après la lère équation (57), que les coefficients de β_0 et de β_L sont complémentaires, c'est-à-dire que leur somme est égale à l'unité.

Des formules (42) et (54) on déduit facilement les expressions des quantités de soluté dans les pulpes épaissies et les solutions clarifiées ou effluents, soit respectivement $b_p = a_p \beta_p$ et $B_p = E_p \beta_p$ (avec $E_p = a_{p+1}$ dans le cas du lavage équilibré), et en particulier la perte absolue $b_n = a_n \beta_n$ et la récupération absolue $B_1 = E_1 \beta_1$ de soluté. Mais nous verrons que l'on peut exprimer directement ces dernières, d'une manière très générale, en fonction de la perte P et du rendement R du lavage.

Rendement et Perte. Concentration relative de la solution récupérée.

Parmi les nombreux rendements qui peuvent être envisagés dans le cas du lavage avec une solution de concentration en soluté β_L , nous n'en retiendrons qu'un seul, que nous appellerons "rendement de lavage proprement dit" ou encore "rendement de l'installation de lavage", et qui a pour expression :

$$R = \frac{E_1 (\beta_1 - \beta_L)}{a_0 (\beta_0 - \beta_L)} \quad (58)$$

d'où, pour la perte correspondante ($P = 1 - R$), en remarquant que $E_1 \beta_1 = a_0 \beta_0 + L \beta_L - a_n \beta_n$ et que $E_1 = a_0 + L - a_n$:

$$P = \frac{a_n (\beta_n - \beta_L)}{a_0 (\beta_0 - \beta_L)} \quad (59)$$

Le rendement R présente l'avantage de n'être fonction que des paramètres (L, n, a_i) du lavage et d'être par conséquent indépendant des concentrations β_0 et β_L mises en jeu. Ainsi lorsque β_L augmente, le rendement R conserve une valeur constante bien que l'efficacité absolue du lavage, c'est-à-dire la quantité de soluté transférée de la pulpe à la solution de lavage, aille en diminuant. Le rendement R caractérise en définitive le degré de perfection de l'installation, considéré indépendamment de l'intérêt pratique de l'opération de lavage qui, lui, est conditionné par la valeur de β_L relativement à β_0 .

Le rendement R et la perte P sont en particulier égaux aux rendement et perte définis, dans le cas où $\beta_L = 0$, et d'une seule manière possible, par les expressions: $R = \frac{E_1 \beta_1}{a_0 \beta_0}$ et $P = \frac{a_n \beta_n}{a_0 \beta_0}$. C'est pourquoi nous donnons encore à R le nom de "rendement du lavage au solvant pur".

Nous appellerons de même "concentration relative de la solution récupérée" (ou "coefficient de dégradation de la solution récupérée", ou encore : "coefficient qualitatif d'extraction"), la quantité représentée par l'expression :

$$\rho = \frac{\beta_1 - \beta_L}{\beta_0 - \beta_L} \quad (60)$$

La concentration relative ρ est, comme le rendement R , indépendante des concentrations β_0 et β_L . Alors que R est un facteur de quantité, ρ est un facteur de qualité.

Le rendement R et la concentration relative ρ sont liés par la relation :

$$R = \frac{E_1}{a_0} \cdot \rho = k_1 \cdot \rho \quad (61)$$

avec $R = \rho$ pour un lavage équilibré.

En remplaçant dans les équations (58) et (60), β_1 par sa valeur tirée des équations (57), on obtient :

$$R = k_1 \cdot K_1, \quad P = 1 - k_1 \cdot K_1, \quad \rho = K_1 \quad (62)$$

et on en déduit, en tenant compte des équations (55) et (56), les expressions de R , P et ρ en fonction des paramètres du lavage, respectivement pour le lavage déséquilibré et le lavage équilibré (+).

Lavage déséquilibré ($\varepsilon \neq 0$) .

$$R = \frac{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - k_1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1}, \quad P = \frac{k_1 - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \quad (63)$$

$$\rho = \frac{k_2 \dots k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} \quad (64)$$

Lavage équilibré ($\varepsilon = 0$) .

$$R = \rho = \frac{c_1 + \dots + c_n}{c_0 + c_1 + \dots + c_n}, \quad P = \frac{c_0}{c_0 + c_1 + \dots + c_n} \quad (65)$$

Pour une pulpe initiale (a_0, β_0) donnée, le rendement R est une fonction croissante de la quantité L de liquide de lavage utilisée (par l'intermédiaire du déséquilibre ε), du nombre n d'étages de lavage et des épaisissements $c_j = 1/a_j$ des pulpes aux différents étages (y compris l'épaissement de la pulpe finale, que l'on opère à ε constant ou à L constant).

(+) Le lavage équilibré ne comporte plus que deux paramètres : nombre n d'étages ; épaisissements c_j des pulpes aux différents étages.

Quant à la concentration relative ρ de la solution récupérée, elle est une fonction décroissante de la quantité L de liquide de lavage, et une fonction croissante du nombre n d'étages et des épaisissements c_j des pulpes aux différents étages (y compris l'épauissement de la pulpe finale, lorsqu'on opère à déséquilibre ε constant).

Pour ce qui est du paramètre L , les quantités R et ρ varient donc en sens contraires. Il s'ensuit que pour une installation de lavage donnée (n et c_j fixes), une augmentation de R ne peut se faire sans une diminution corrélative de ρ , et inversement.

On a par ailleurs $R > \rho$ si $k_1 > 1$ ou $\varepsilon > 0$ (lavage déséquilibré par excès); $R < \rho$ si $k_1 < 1$ ou $\varepsilon < 0$ (lavage déséquilibré par défaut); $R = \rho$ si $k_1 = 1$ ou $\varepsilon = 0$ (lavage équilibré).

Lorsque $n \rightarrow \infty$:

$$\begin{array}{llll} \underline{\varepsilon > 0} . & R \rightarrow 1 & , & P \rightarrow 0 & , & \rho \rightarrow 1/k_1 \\ \underline{\varepsilon < 0} . & R \rightarrow k & , & P \rightarrow (1 - k_1) & , & \rho \rightarrow 1 \\ \underline{\varepsilon = 0} . & R \rightarrow 1 & , & P \rightarrow 0 & , & \rho \rightarrow 1 \end{array}$$

D'autre part, le rendement de lavage R est une fonction décroissante de l'épauissement c_0 , donc une fonction croissante de la dilution a_0 de la pulpe initiale (de même d'ailleurs que la concentration relative ρ de la solution récupérée). Il ne faut cependant pas en conclure qu'on a intérêt à laver une pulpe aussi diluée que possible, car le rendement n'est qu'une notion relative, la perte absolue de soluté P_{abs} étant, quant à elle, d'autant plus élevée que la dilution initiale de la pulpe est plus grande.

°
° °

Dans le cas particulier où la quantité de liquide de lavage serait nulle ($L = 0$), on aurait (avec bien entendu ici $a_n \leq a_0$) :

$$\varepsilon = -a_n \quad , \quad E_1 = a_0 - a_n \quad , \quad k_{n+1} = 0$$

et par suite :

$$P = 1 - k_1 = \frac{a_n}{a_0} \quad , \quad R = k_1 = \frac{a_0 - a_n}{a_0} = 1 - \frac{a_n}{a_0} \quad , \quad \rho = 1 \quad (66)$$

Le système se réduirait alors à une simple station d'épauissement, le rendement correspondant constituant évidemment, pour une installation de lavage donnée (n et a_j fixes), le "rendement minimal".

Récupération et Perte absolues.

En remarquant qu'on a $E_1 = k_1 \cdot a_0$, et en tenant compte de la 1ère équation (57), on peut écrire :

$$\begin{array}{l} E_1 \beta_1 = k_1 \cdot a_0 [K_1 \cdot \beta_0 + (1 - K_1) \beta_L] \\ \qquad \qquad = k_1 K_1 \cdot a_0 \beta_0 + (k_1 \cdot a_0 - k_1 K_1 \cdot a_0) \beta_L \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} E_1 \beta_1 = k_1 \cdot a_0 [K_1 \cdot \beta_0 + (1 - K_1) \beta_L] \\ \qquad \qquad = k_1 K_1 \cdot a_0 \beta_0 + (k_1 \cdot a_0 - k_1 K_1 \cdot a_0) \beta_L \end{array}} \right\} \quad (67)$$

La quantité totale de soluté récupérée par unité de masse d'insoluble (ou récupération absolue) peut donc aussi se mettre sous les formes suivantes, en se rappelant que $k_1 K_1 = R$ et que $E_1 = a_o + \varepsilon$:

$$\left. \begin{aligned} R_{abs} = B_1 = E_1 \beta_1 &= R a_o \beta_o + (E_1 - R a_o) \beta_L \\ &= R a_o \beta_o + (P a_o + \varepsilon) \beta_L \\ &= R a_o (\beta_o - \beta_L) + E_1 \beta_L \end{aligned} \right\} \quad (68)$$

On obtient de même comme expressions de la quantité totale de soluté perdue par unité de masse d'insoluble (ou perte absolue), en observant que $a_n \beta_n = a_o \beta_o + L \beta_L - E_1 \beta_1$ et que $L - E_1 = a_n - a_o$:

$$\left. \begin{aligned} P_{abs} = b_n = a_n \beta_n &= P a_o \beta_o + (a_n - P a_o) \beta_L \\ &= P a_o (\beta_o - \beta_L) + a_n \beta_L \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

Des limites vers lesquelles tendent le rendement R et la perte P , on déduit aisément les limites suivantes de R_{abs} et P_{abs} , quand $n \longrightarrow \infty$:

$$\begin{array}{lll} \underline{\varepsilon > 0} . & R_{abs} \longrightarrow a_o \beta_o + \varepsilon \beta_L & ; \quad P_{abs} \longrightarrow a_n \beta_L \\ \underline{\varepsilon < 0} . & R_{abs} \longrightarrow k_1 . a_o \beta_o & ; \quad P_{abs} \longrightarrow (1 - k_1) a_o \beta_o + L \beta_L \\ & & = |\varepsilon| \beta_o + L \beta_L \\ \underline{\varepsilon = 0} . & R_{abs} \longrightarrow a_o \beta_o & ; \quad P_{abs} \longrightarrow a_n \beta_L = L \beta_L \end{array}$$

°
° °

Le lavage d'une pulpe (a_o, β_o) avec une solution (L, β_L) peut être examiné à deux points de vue différents : Comparaison du lavage à la solution avec le lavage au solvant pur correspondant ; Propriétés résultant du fait que le lavage à la solution s'effectue entre les deux niveaux de concentrations β_o et β_L .

En ce qui concerne la comparaison du lavage à la solution avec le lavage au solvant pur effectué dans les mêmes conditions, on voit sur les premières équations des groupes (68) et (69) que les quantités totales de soluté récupéré et perdu par unité de masse d'insoluble peuvent être considérées comme la somme de deux termes : un terme en β_o correspondant à la pulpe initiale et subsistant seul lorsque le lavage est effectué au solvant pur ($\beta_L = 0$) ; et un terme en β_L relatif à la solution de lavage et représentant l'apport supplémentaire de celle-ci comparative-ment au solvant pur. Pour ce qui est de la quantité de soluté récupérée, pour un lavage de déséquilibre ε donné, le terme en β_o augmente tandis que le terme en β_L diminue, lorsque le rendement R de lavage croît.

Quant aux propriétés résultant du fait que l'opération de lavage avec une solution s'effectue entre les deux niveaux de concentrations β_o et β_L , il apparaît sur les dernières équations des groupes (68) et (69) que les quantités totales de soluté récupéré et perdu par unité de masse d'insoluble peuvent encore être considérées comme la somme de deux termes : un terme en $(\beta_o - \beta_L)$, qui se rapporte à l'opération de lavage proprement dite s'effectuant entre les niveaux de concentrations β_o et β_L , et qui est fonction de la qualité du lavage, c'est-à-dire du rendement R de lavage ; et un terme en β_L , qui représente la masse de soluté dans la quantité correspondante de solution dont la concentration est au niveau de base β_L , et qui

est indépendant de la qualité du lavage. Lorsque la concentration β_L de la solution de lavage croît, les termes en $(\beta_0 - \beta_L)$ aussi bien dans l'expression de la quantité de soluté récupéré que dans celle de soluté perdu vont en diminuant, indépendamment de la qualité du lavage, par suite du rapprochement des niveaux de concentrations entre lesquels on opère, tandis que les termes en β_L vont en augmentant. Ainsi, l'efficacité absolue du lavage (c'est-à-dire la quantité de soluté transférée de la pulpe à la solution de lavage) et par conséquent le rendement pratique de l'opération, diminuent à mesure que la concentration β_L augmente. En particulier, dans le cas théorique où $\beta_L = \beta_0$, il n'y a plus de lavage au sens physique du terme.

De l'étude générale que nous avons faite, il ressort que c'est seulement quand $\varepsilon = 0$, d'où $E_1 = a_0$, que $E_1\beta_1$ tend vers $a_0\beta_0$ et que β_1 tend vers β_0 lorsque n augmente indéfiniment, le rendement de lavage R et la concentration relative ρ de la solution récupérée (qui alors s'identifient) tendant tous deux vers l'unité. Le lavage à contre-courant équilibré ($\varepsilon = 0$) est le seul type de lavage par dilution qui, moyennant un nombre élevé d'étages, puisse permettre d'envisager la récupération quasi intégrale de la solution d'imprégnation de la pulpe initiale à la fois en quantité et qualité. Si on augmente la quantité de liquide utilisée pour le lavage ($\varepsilon > 0$), celui-ci se trouve facilité et on peut réaliser avec un plus petit nombre d'étages le degré de récupération que l'on s'est fixé, mais au prix d'une dilution de la solution recueillie. Si par contre on effectue le lavage avec une quantité moindre de liquide ($\varepsilon < 0$) on obtiendra d'autant plus facilement, c'est-à-dire avec d'autant moins d'étages, une concentration de la solution récupérée voisine de celle de la solution d'imprégnation initiale que cette quantité de liquide de lavage sera plus faible, mais ce sera au prix d'une diminution corrélative du rendement.

b) Lavage à équi-épaississement

Nous appelons lavage à équi-épaississement, un lavage dans lequel les dilutions des pulpes épaissies sont, à tous les étages, égales à la dilution de la pulpe initiale :

$$a_1 = a_2 = \dots = a_n = a_0 \quad (70)$$

ces dilutions pouvant représenter, suivant les cas, des volumes de solution, des masses de solution ou des masses de solvant, par unité de masse d'insoluble.

Il peut ainsi exister des systèmes qui sont pratiquement à équi-épaississement pour un certain mode de caractérisation des pulpes (volumes de solution, masses de solution ou masses de solvant, par unité de masse d'insoluble), alors qu'ils en sont plus ou moins éloignés si l'on considère les deux autres modes. Le terme "équi-épaississement" a donc, suivant les cas, des significations physiques différentes.

Alors que dans un lavage équilibré la solution récupérée à l'effluent du premier laveur est équivalente à la solution d'imprégnation de la pulpe initiale, c'est la solution perdue avec la pulpe résiduelle sortant du dernier laveur qui lui est équivalente dans un lavage à équi-épaississement.

Du fait que $a_n = a_o$, les expressions (58) et (59) définissant le rendement $R = 1 - P$ et la perte P de lavage prennent des formes plus simples, de sorte qu'on a finalement (l'expression par laquelle est définie la concentration relative ρ restant inchangée) (+) :

$$R = \frac{\beta_o - \beta_n}{\beta_o - \beta_L}, \quad P = \frac{\beta_n - \beta_L}{\beta_o - \beta_L}, \quad \rho = \frac{\beta_1 - \beta_L}{\beta_o - \beta_L} \quad (71)$$

De même, la 1ère équation (69) donnant l'expression de la perte absolue devient :

$$P_{abs} = b_n = a_o \beta_n = P a_o \cdot \beta_o + (1 - P) a_o \cdot \beta_L \quad (72)$$

si bien qu'on peut alors considérer que la solution finale a_o à la concentration β_n est formée d'une fraction $P a_o$ à la concentration β_o et d'une fraction $(1 - P) a_o$ à la concentration β_L .

Lavage à équi-épaississement déséquilibré.

En posant :

$$L = \lambda a_o \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{L}{a_o} \quad (73)$$

on a, d'après les équations (13) et (14) :

$$E_1 = E_2 = \dots = E_n = L = a_o + \varepsilon = \lambda a_o \quad (74)$$

et par suite, d'après la relation (24) :

$$k_1 = k_2 = \dots = k_{n+1} = \lambda \quad (75)$$

On obtient d'autre part, comme expression du déséquilibre du lavage :

$$\varepsilon = L - a_o = (\lambda - 1) a_o \quad (76)$$

le lavage étant déséquilibré par excès si $\lambda > 1$, déséquilibré par défaut si $\lambda < 1$, équilibré si $\lambda = 1$.

Les formules (63) et (64) donnant les expressions de R , P et ρ en fonction des paramètres du lavage deviennent, dans le cas présent :

$$R = \frac{\lambda^{n+1} - \lambda}{\lambda^{n+1} - 1}, \quad P = \frac{\lambda - 1}{\lambda^{n+1} - 1}, \quad \rho = \frac{\lambda^n - 1}{\lambda^{n+1} - 1} \quad (77)$$

R et ρ étant liés par la relation : $R = \lambda \cdot \rho$.

(+) On a dans un lavage équilibré : $R = \rho = \frac{\beta_1 - \beta_L}{\beta_o - \beta_L}$, tandis qu'on a dans un lavage à équi-épaississement : $P = \pi = \frac{\beta_n - \beta_L}{\beta_o - \beta_L}$, la quantité π pouvant être appelée "concentration relative de la solution d'imprégnation de la pulpe finale".

On peut vérifier que si dans les expressions de R et de ρ on donne successivement à λ deux valeurs inverses : λ_1 et $\lambda_2 = 1/\lambda_1$, on obtient deux couples de valeurs, (R_1, ρ_1) et (R_2, ρ_2) , tels que $R_2 = \rho_1$ et $\rho_2 = R_1$. En particulier, $R = \rho$ lorsque $\lambda = 1$.

Le système ne comporte plus que deux paramètres : quantité L de liquide de lavage utilisée, par l'intermédiaire du "facteur de lavage" λ ; nombre n d'étages. Le rendement R est une fonction croissante de λ et de n , tandis que la concentration relative ρ est une fonction décroissante de λ et une fonction croissante de n .

Lavage à équi-épaississement équilibré.

On a alors :

$$L = a_0 \quad \text{ou} \quad \varepsilon = 0 \quad (78)$$

d'où :

$$E_1 = E_2 = \dots E_n = L = a_0 \quad (79)$$

et :

$$c_1 = c_2 = \dots = c_n = c_0 \quad (80)$$

On en déduit comme expressions de R , P et ρ , d'après les équations (65) :

$$R = \rho = \frac{n}{n+1}, \quad P = \frac{1}{n+1} \quad (81)$$

Le système ne comporte plus dans ce cas qu'un seul paramètre : le nombre n d'étages de lavage. Le rendement R est une fonction croissante de n et tend asymptotiquement vers l'unité quand n croît indéfiniment.

°
° °

c) Lavage dans lequel une partie du soluté de la pulpe initiale est à l'état solide ou indissous.

Lavages polythermes

Dans le cas présent, une partie du constituant à extraire se trouve à l'état solide ou indissous dans la pulpe initiale, cette fraction solide pouvant provenir soit de soluté n'ayant pas été initialement dissous, soit de soluté ayant recristallisé par suite d'un refroidissement de la pulpe postérieurement à la dissolution.

Nous supposons ici que les dilutions (a_i) des pulpes, et par suite les effluents (E_i) , représentent des masses de solvant par unité de masse d'insoluble, les concentrations étant alors exprimées en masse de soluté par unité de masse de solvant. Quant à L , il désignera la masse de solvant utilisée sous forme de liquide de lavage par unité de masse d'insoluble.

Représentons par (b_o^*) la quantité totale de soluté contenue dans la pulpe initiale par unité de masse d'insoluble, laquelle se compose d'une partie (b_o) sous forme de solution saturée à la concentration β_o et d'une partie (d_o) à l'état solide ou indissous :

$$b_o^* = b_o + d_o = a_o \beta_o + d_o \quad (82)$$

En posant $f = d_o/b_o$, on peut encore écrire :

$$b_o^* = b_o + f \cdot b_o = (1+f) b_o = (1+f) a_o \beta_o = a_o \beta_o^* \quad (83)$$

β_o^* désignant la concentration fictive globale correspondant à la totalité du soluté :

$$\beta_o^* = (1+f) \beta_o \quad (84)$$

D'une manière générale, nous marquerons également d'un astérisque les symboles b_p^* ou β_p^* se rapportant au soluté total contenu dans les pulpes épaissies sortant des étages de rang p , lorsqu'une partie de ce soluté s'y trouve à l'état solide. Les symboles b_p et β_p conserveront leur signification habituelle et correspondront au soluté à l'état dissous (en solution saturée ou non).

La quantité minimale ($\ell_{\min}$) de liquide de lavage nécessaire à la dissolution de la masse (d_o) de soluté indissous est définie par les relations (+) :

$$a_o \beta_o + \ell_{\min} (\beta_o - \beta_L) = a_o \beta_o^* \quad (85)$$

ou :

$$\ell_{\min} = f a_o \frac{\beta_o}{\beta_o - \beta_L} \quad (86)$$

Nous distinguerons deux cas, suivant la quantité L de liquide de lavage utilisée et le déséquilibre correspondant ($\varepsilon = L - a_n$) du lavage.

1) $L < (a_n + \ell_{\min})$ ou $\varepsilon < \ell_{\min}$.

On a alors $E_1 < (a_o + \ell_{\min})$, de sorte que la quantité de solvant qui passe à l'effluent du premier laveur est inférieure à la quantité minimale nécessaire à la dissolution de la totalité du soluté contenu dans la pulpe initiale (a_o, β_o^*) . Il en résulte que la solution récupérée atteindra sa concentration de saturation β_o , et par suite la récupération de soluté sa valeur maximale $E_1 \beta_o$, pour un nombre fini (n) d'étages de lavage (et même avec un étage unique dans le cas où l'on aurait $L \leq \ell_{\min}$). Il ne servirait évidemment à rien d'augmenter le nombre d'étages au-delà de n , la solution clarifiée du premier laveur ne pouvant de toute façon entraîner une quantité de soluté supérieure à celle qui correspond à sa saturation. Ce cas de lavage est comparable à celui d'un lavage méthodique pour lequel la totalité du soluté à extraire serait en solution dans la pulpe initiale ($\ell_{\min} = 0$) et de déséquilibre $\varepsilon < 0$ (lavage déséquilibré par défaut). Mais alors que la concentration β_o de la solution récupérée n'est obtenue qu'avec un nombre infini d'étages dans le cas du lavage à solubilisation initiale complète, elle l'est avec un nombre fini d'étages dans le cas du présent lavage.

(+) Nous supposons évidemment que les temps de contact des pulpes et des solutions de lavage sont suffisants pour que la dissolution ait effectivement lieu.

Le nombre (n) d'étages avec lequel est obtenue la récupération de soluté maximale est, d'après la dernière relation (42), déterminé par les équations :

$$\frac{k_2 \dots k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} (\beta_o^* - \beta_L) + \beta_L = \beta_o \quad (87)$$

ou :

$$\frac{k_2 \dots k_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k_2 \dots k_{n+1} - 1} = \frac{\beta_o - \beta_L}{\beta_o^* - \beta_L} = \frac{\beta_o - \beta_L}{(1+f)\beta_o - \beta_L} = \frac{\beta_o - \beta_L}{\beta_o - \beta_L + f \cdot \beta_o} \quad (88)$$

Si - comme cela est généralement le cas - le calcul conduit à un nombre non entier d'étages, c'est le nombre entier immédiatement supérieur qu'il conviendra d'adopter pour (n). Il restera alors du soluté indissous dans la pulpe épaissie sortant du premier laveur, et on aura comme expression du flux net de soluté :

$$F = b_o^* - B_1 = b_1^* - B_2 = b_2 - B_3 = \dots = b_{p-1} - B_p = \dots = b_n - B_L \quad (89)$$

Si le lavage méthodique de la pulpe (a_o, β_o^*) est effectué avec un nombre d'étages inférieur au nombre (n) correspondant à la saturation de l'effluent du premier laveur, il se comportera comme un lavage méthodique de même nombre d'étages dans lequel la totalité du soluté serait à l'état dissous dans la pulpe initiale.

2) $L \geq (a_n + \ell_{\min})$ ou $\varepsilon \geq \ell_{\min}$.

Ce cas de lavage est comparable à celui d'un lavage à contre-courant pour lequel la totalité du soluté à extraire serait en solution dans la pulpe initiale ($\ell_{\min} = 0$) et de déséquilibre $\varepsilon \geq 0$ (lavage équilibré ou déséquilibré par excès). On aura la récupération maximale de soluté pour un nombre infini d'étages, la concentration β_1 de la solution récupérée à l'effluent du premier laveur ayant alors pour limite β_o ou $(1/k_1)\beta_o^* + (1 - 1/k_1)\beta_L$, suivant que ε est égal ou supérieur à $\ell_{\min}$, c'est-à-dire que L est égal ou supérieur à $(a_n + \ell_{\min})$.

En résumé, le lavage méthodique d'une pulpe dans laquelle une partie du soluté à extraire est à l'état solide, offre pratiquement les mêmes caractéristiques que le lavage méthodique à solubilisation initiale complète correspondant (déséquilibré par défaut, équilibré, déséquilibré par excès), mais pour des quantités L ou ε de liquide de lavage augmentées, par rapport à ce dernier lavage, de la quantité minimale ($\ell_{\min}$) de liquide nécessaire à la dissolution de la masse (d_o) de soluté indissous contenu dans la pulpe par unité de masse d'insoluble.

°
° °

Nous avons jusqu'ici supposé que les lavages considérés étaient des lavages isothermes, c'est-à-dire que les températures des pulpes étaient les mêmes à tous les étages. Nous dirons maintenant un mot des lavages méthodiques polythermes, pour lesquels les températures des pulpes sont différentes d'un étage à l'autre. Nous supposerons que pour ceux-ci les températures vont en décroissant du premier au dernier étage et qu'en outre la solubilité du constituant à extraire croît avec la température (comme cela est généralement le cas).

Si dans un lavage polytherme, la chute de température et la diminution de concentration en soluté des pulpes tout au long du lavage sont telles que la totalité du soluté soit à l'état de solution dans les pulpes épaissies sortant de chaque étage

(même si une partie du soluté était à l'état solide dans la pulpe initiale), ce lavage polytherme se ramène au lavage isotherme correspondant (lavage à solubilisation initiale complète). Cette éventualité a d'autant plus de chances de se produire que la solution d'imprégnation de la pulpe initiale soumise au lavage est plus éloignée de la saturation, que la quantité de liquide de lavage utilisée est plus importante, à une concentration en soluté plus faible et à une température plus élevée, et qu'enfin les déperditions de chaleur du dispositif vers le milieu extérieur sont plus réduites.

Il peut, par contre, exister des lavages polythermes tels qu'une partie du soluté soit à l'état solide dans la pulpe sortant du premier laveur ou dans les pulpes sortant d'un ou de plusieurs des laveurs suivants (dont les effluents sont alors saturés), même si la totalité du soluté était en solution dans la pulpe initiale, et a fortiori si une partie du soluté y était à l'état solide. Il est bien évident que dans ces cas, les équations que nous avons établies ne peuvent plus s'appliquer sans modifications.

°
° °

2) CAS DE L'HOMOGENEISATION INCOMPLETE

Nous avons supposé jusqu'ici que l'on réalisait, à l'entrée des différents étages du système, une homogénéisation complète des pulpes épaissies et des solutions de lavage (les étages étant alors dits "théoriques"). Il en résultait que les solutions clarifiées ou effluents et les solutions d'imprégnation des pulpes épaissies provenant d'un même étage de rang p étaient à une même concentration en soluté β_p (tout au moins si la totalité du soluté était à l'état dissous dans les pulpes correspondantes, ce que nous admettons implicitement).

Nous allons supposer maintenant que cette homogénéisation des pulpes épaissies et des solutions de lavage à l'entrée des divers étages est incomplète, et qu'en conséquence les concentrations moyennes en soluté des solutions clarifiées et des solutions d'imprégnation des pulpes épaissies sortant d'un même étage de rang p sont différentes et ont pour valeurs respectives β_p' et β_p'' . Les concentrations moyennes des solutions clarifiées peuvent être inférieures à celles des solutions d'imprégnation des pulpes épaissies correspondantes ($\beta_p' < \beta_p''$), ce qui constitue une condition défavorable au lavage par rapport à l'homogénéisation complète : c'est le phénomène de la dilution imparfaite. Les concentrations moyennes des solutions clarifiées peuvent au contraire être supérieures à celles des solutions d'imprégnation des pulpes épaissies correspondantes ($\beta_p' > \beta_p''$), ce qui constitue une condition favorable au lavage par rapport à l'homogénéisation complète : c'est le phénomène du déplacement.

Nous considérerons uniquement, pour l'instant, la question de la dilution imparfaite. Le lavage par déplacement - dont le principe est entièrement différent de celui des lavages par dilution examinés ici et qui exige de ce fait des structures de pulpes et des conditions opératoires bien particulières - fera à lui seul l'objet de la deuxième partie de notre étude.

Nous admettons donc qu'à l'entrée de chaque décanteur-laveur de rang p , le mélange de la pulpe épaissie provenant du $(p-1)$ ème laveur avec la solution clarifiée sortant du $(p+1)$ ème laveur est réalisé de manière imparfaite, de sorte que l'on a autour des particules solides une concentration en soluté supérieure à celle du reste de la solution et qu'en conséquence l'effluent du laveur de rang p est à une concentration moyenne β_p' inférieure à celle β_p'' de la solution d'imprégnation de la pulpe épaissie sortant de ce même laveur (fig.2), soit :

$$\beta_p' < \beta_p''$$

Les équations (6) de conservation de la phase liquide et les expressions (15) du déséquilibre du lavage, écrites dans le cas de la dilution parfaite, restent valables pour l'homogénéisation incomplète.

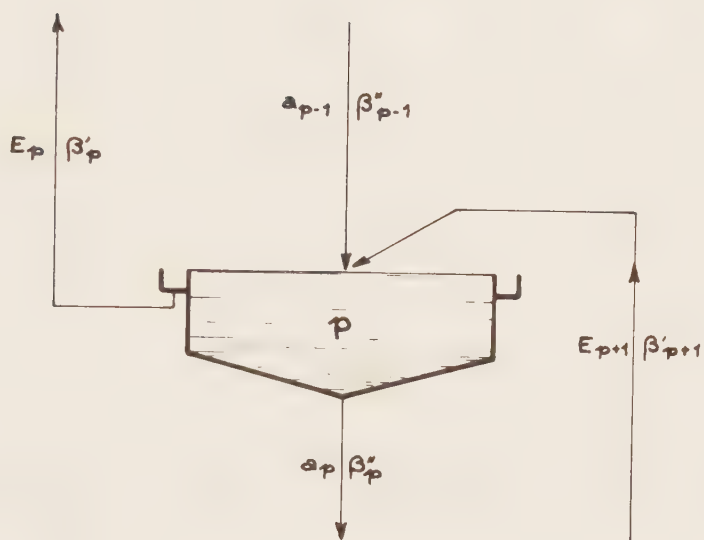


Fig. 2

Par contre, l'équation générale de conservation du soluté pour le laveur de rang p devient, dans le cas présent :

$$a_{p-1}\beta_{p-1}'' + E_{p+1}\beta_{p+1}' = a_p\beta_p'' + E_p\beta_p' \quad (90)$$

et on a de même pour le flux net de soluté (en notant que $E_{n+1} \equiv L$ et $\beta_{n+1}' \equiv \beta_L$) :

$$F = a_0\beta_0 - E_1\beta_1' = \dots = a_{p-1}\beta_{p-1}'' - E_p\beta_p' = \dots = a_n\beta_n'' - L\beta_L \quad (91)$$

les équations (90) et (91) contenant à la fois des concentrations de solutions d'imprégnation de pulpes et des concentrations de solutions clarifiées ou effluents.

On a par ailleurs comme expressions du rendement effectif de lavage proprement dit :

$$R = \frac{E_1(\beta_1' - \beta_L)}{a_0(\beta_0 - \beta_L)} \quad (92)$$

de la perte correspondante ($P = 1 - R$), en remarquant que $E_1\beta_1' = a_0\beta_0 + L\beta_L - a_n\beta_n''$ et que $E_1 = a_0 + L - a_n$:

$$P = \frac{a_n(\beta_n'' - \beta_L)}{a_0(\beta_0 - \beta_L)} \quad (93)$$

et de la concentration relative de la solution récupérée :

$$\rho = \frac{\beta_1' - \beta_L}{\beta_0 - \beta_L} \quad (94)$$

°
° °

Pour traiter commodément la question de la dilution imparfaite, nous allons introduire, pour chaque étage de rang p , un "coefficient de dilution σ_p ", défini, à partir des concentrations moyennes en soluté β_p' , β_p'' et β_{p+1}' déterminées expérimentalement, par l'expression (+) :

$$\sigma_p = \frac{\beta_p' - \beta_{p+1}'}{\beta_p'' - \beta_{p+1}'} \quad (95)$$

Ce coefficient est égal à l'unité quand l'homogénéisation est réalisée de façon parfaite ($\beta_p' = \beta_p'' = \beta_p$), prend une valeur inférieure à l'unité quand l'opération est imparfaitement réalisée ($\beta_p' < \beta_p''$), et tend vers zéro quand la concentration de l'effluent du p ième décanteur tend vers la même valeur que celle de l'effluent du $(p+1)$ ième décanteur ($\beta_p' \rightarrow \beta_{p+1}'$), autrement dit quand les conditions opératoires sont si mauvaises que tout se passe comme si le p ième décanteur n'avait pas fonctionné comme laveur (à condition, bien entendu, qu'il n'y ait pas gain d'épaississement dans ce p ième décanteur, c'est-à-dire que $a_p > a_{p+1}$).

L'introduction des coefficients de dilution permet une étude analogique très simple de la dilution imparfaite.

En remarquant que l'on a, d'après l'expression (95) :

$$\beta_p'' = \frac{1}{\sigma_p} \beta_p' - \left(\frac{1}{\sigma_p} - 1\right) \beta_{p+1}' \quad (96)$$

(+) On a évidemment $\sigma_0 \equiv 1$.

On a d'autre part, dans le cas d'un étage unique, $\sigma = \frac{\beta_1' - \beta_L}{\beta_1'' - \beta_L}$.

on peut transformer l'équation (90) en la suivante, où figurent uniquement des concentrations d'effluents :

$$a_{p-1} \left[\frac{1}{\sigma_{p-1}} \cdot \beta_{p-1}' - \left(\frac{1}{\sigma_{p-1}} - 1 \right) \beta_p' \right] + E_{p-1} \beta_{p+1}' = a_p \left[\frac{1}{\sigma_p} \beta_p' - \left(\frac{1}{\sigma_p} - 1 \right) \beta_{p+1}' \right] + E_p \beta_p'$$

puis la réarranger en :

$$\frac{1}{\sigma_{p-1}} a_{p-1} \cdot \beta_{p-1}' + \left[(E_{p-1} + \left(\frac{1}{\sigma_p} - 1 \right) a_p) \right] \beta_{p+1}' = \left[\frac{1}{\sigma_p} a_p + E_p + \left(\frac{1}{\sigma_{p-1}} - 1 \right) a_{p-1} \right] \beta_p' \quad (97)$$

En posant alors, d'une façon générale :

$$\left. \begin{aligned} a_p' &= \frac{1}{\sigma_p} a_p & , & & \text{avec} & & a_p' > a_p \\ E_p' &= E_p + \left(\frac{1}{\sigma_{p-1}} - 1 \right) a_{p-1} \end{aligned} \right\} \quad (98)$$

d'où :

$$a_p = \sigma_p \cdot a_p' \quad , \quad E_p = E_p' - (1 - \sigma_{p-1}) a_{p-1}' \quad (99)$$

on peut finalement mettre l'équation générale (90) sous la forme symbolique :

$$a_{p-1}' \beta_{p-1}' + E_{p-1}' \beta_{p+1}' = (a_p' + E_p') \beta_p' \quad (100)$$

absolument analogue à l'équation générale de conservation du soluté du lavage à homogénéisation complète tirée du système (17) .

Précisons que dans l'équation (100) , les lettres accentuées β_i' désignent des concentrations réelles d'effluents, tandis que les lettres accentuées a_i' et E_i' représentent des dilutions et des effluents fictifs définis, en fonction des dilutions et des effluents réels a_i et E_i , par les relations (98) .

L'intérêt de cette écriture analogique à symboles accentués est qu'elle est valable pour toutes les autres équations du lavage, ainsi que nous allons le montrer.

L'équation générale de conservation de la phase liquide tirée du système (6) , inchangée en cas de dilution imparfaite :

$$a_{p-1} + E_{p+1} = a_p + E_p \quad (101)$$

devient, quand on remplace les lettres ordinaires par les lettres accentuées, d'après les relations (99) :

$$\sigma_{p-1} \cdot a_{p-1}' + E_{p+1}' - (1 - \sigma_p) a_p' = \sigma_p \cdot a_p' + E_p' - (1 - \sigma_{p-1}) a_{p-1}'$$

ou :

$$a_{p-1}' + E_{p+1}' = a_p' + E_p' \quad (102)$$

Le déséquilibre du lavage n'est pas modifié lorsqu'on raisonne sur les effluents et les dilutions fictifs, puisqu'on a :

$$\varepsilon = E_p - a_{p-1} = E_p' - (1 - \sigma_{p-1}) a_{p-1}' - \sigma_{p-1} \cdot a_{p-1}' = E_p' - a_{p-1}' \quad (103)$$

de sorte que l'équation donnant la valeur des effluents en fonction des dilutions devient, en écriture symbolique :

$$E_p' = a_{p-1}' + \varepsilon \quad (104)$$

avec en particulier : $E_1' = a_0 + \varepsilon = E_1$ et $E_{n+1}' = L' = a_n' + \varepsilon$.

De même, en explicitant la relation déduite de l'équation (100) :

$$a'_{p-1}\beta'_{p-1} - E'_p\beta'_p = a'_p\beta'_p - E'_{p+1}\beta'_{p+1} \quad (105)$$

on obtient l'expression du flux net de soluté en écriture analogique (en observant que $E'_{n+1} \equiv L'$ et $\beta'_{n+1} \equiv \beta_L$) :

$$F = a_0\beta_0 - E_1\beta'_1 = \dots = a'_{p-1}\beta'_{p-1} - E'_p\beta'_p = \dots = a'_n\beta'_n - L'\beta_L \quad (106)$$

Il résulte de ce qui précède que les concentrations réelles β'_p des effluents aux divers étages du lavage déséquilibré à dilution imparfaite s'obtiennent simplement en remplaçant dans les équations (42) les facteurs k_j par des facteurs k'_j tels que :

$$k'_j = \frac{E'_j}{a'_{j-1}} = 1 + \frac{\varepsilon}{a'_{j-1}} = 1 + \varepsilon \cdot c'_{j-1} \quad , \quad c'_j = \frac{1}{a'_j} \quad (107)$$

$$\text{avec en particulier :} \quad k'_1 = \frac{E_1}{a_0} = 1 + \frac{\varepsilon}{a_0} = k_1 \quad , \quad c'_0 = \frac{1}{a_0} = c_0 .$$

On a ainsi (+) :

$$\left. \begin{aligned} \beta'_p &= K'_p \cdot \beta_0 + (1 - K'_p) \beta_L \\ &= K'_p (\beta_0 - \beta_L) + \beta_L \end{aligned} \right\} \quad (108)$$

avec :

$$K'_p = \frac{k'_{p+1} \dots k'_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k'_2 \dots k'_{n+1} - 1} \quad (109)$$

Les concentrations réelles β''_p des solutions d'imprégnation des pulpes se déduisent facilement, par l'intermédiaire de la relation (96) , des concentrations β'_p et β'_{p+1} d'effluents :

$$\begin{aligned} \beta''_p &= \frac{\beta_0 - \beta_L}{k_1 \cdot k'_2 \dots k'_{n+1} - 1} \left[\frac{1}{\sigma_p} (k'_{p+1} \cdot k'_{p+2} \dots k'_{n+1} - 1) - \left(\frac{1}{\sigma_p} - 1 \right) (k'_{p+2} \dots k'_{n+1} - 1) \right] + \beta_L \\ &= \frac{\beta_0 - \beta_L}{k_1 \cdot k'_2 \dots k'_{n+1} - 1} \left[k'_{p+2} \dots k'_{n+1} \left[\frac{1}{\sigma_p} (k'_{p+1} - 1) + 1 \right] - 1 \right] + \beta_L \end{aligned}$$

$$\text{d'où finalement, en remarquant que} \quad \frac{1}{\sigma_p} = \frac{a'_p}{a_p} = \frac{\varepsilon / (k'_{p+1} - 1)}{\varepsilon / (k_{p+1} - 1)} = \frac{k_{p+1} - 1}{k'_{p+1} - 1} \quad :$$

$$\left. \begin{aligned} \beta''_p &= K''_p \cdot \beta_0 + (1 - K''_p) \beta_L \\ &= K''_p (\beta_0 - \beta_L) + \beta_L \end{aligned} \right\} \quad (110)$$

avec :

$$K''_p = \frac{k_{p+1} \cdot k'_{p+2} \dots k'_{n+1} - 1}{k_1 \cdot k'_2 \dots k'_{n+1} - 1} \quad (111)$$

On voit que l'expression de β''_p ne diffère de celle de β'_p que par la substitution de k_{p+1} à k'_{p+1} .

(+) Les concentrations β'_p dans le cas du lavage équilibré à dilution imparfaite s'obtiendraient pareillement en remplaçant, dans les équations (54) , les c_j par des c'_j .

A partir des concentrations β_p^I et β_p^{II} , on obtient immédiatement les valeurs des quantités b_p et B_p de soluté dans les pulpes épaissies et les effluents :

$$b_p = a_p \beta_p^{II} \quad , \quad B_p = E_p \beta_p^I \quad (112)$$

Outre qu'elle permet de déterminer entièrement les concentrations et les quantités de soluté dans les effluents et les pulpes épaissies aux différents étages du lavage, l'étude qui précède montre que tout se passe, dans le cas de la dilution imparfaite, comme si l'on avait réalisé un moins bon épaississement des pulpes, les épaississements fictifs c_p^I qui régissent alors le lavage étant simplement égaux aux produits des épaississements réels c_p par les coefficients de dilution σ_p correspondants :

$$c_p^I = \frac{1}{a_p^I} = \sigma_p \cdot \frac{1}{a_p} = \sigma_p \cdot c_p \quad (113)$$

Les coefficients de dilution, qui expriment le degré d'homogénéité des mélanges à l'entrée des différents étages, caractérisent donc l'efficacité du dispositif de lavage au même titre que les épaississements des pulpes à ces mêmes étages. Ils jouent ainsi le rôle de pseudo-épaississements et peuvent en définitive être considérés comme un quatrième paramètre du lavage.

Connaissant les valeurs des divers coefficients de dilution (aisément calculables à partir des concentrations moyennes déterminées expérimentalement) il est donc possible de chiffrer exactement la répercussion que la dilution imparfaite a sur le lavage.

Ainsi que cela a lieu pour les épaississements, les effets de la dilution imparfaite sont d'autant moins marqués que le nombre des étages de lavage est plus élevé, les compositions des solutions de lavage et des solutions d'imprégnation des pulpes étant d'autant plus voisines que le nombre d'étages est plus grand.

L'homogénéisation des pulpes épaissies et des solutions de lavage à l'entrée des différents laveurs étant une opération relativement facile à réaliser (au besoin à l'aide d'un appareil de mélange), il est très important de vérifier que dans les installations de lavage par dilution, les coefficients de dilution sont bien égaux à l'unité, c'est-à-dire que pour chaque laveur, la solution clarifiée de l'effluent et la solution d'imprégnation de la pulpe épaissie sont bien à la même concentration en soluté.

°
° °

3) EXEMPLES NUMERIQUES

a) Homogénéisation complète

Dans une installation de lavage à contre-courant comportant 3 étages, on veut traiter 21,5 m³/h de boues potassiques initiales de décantation avec 25 m³/h de solution de lavage.

Les compositions des boues initiales et de la solution de lavage sont les suivantes (le KCl étant le seul constituant de valeur) :

<u>Boues initiales</u>			<u>Solution de lavage</u>		
H ₂ O	:	40,20 ‰	H ₂ O	:	94,90 ‰
KCl	:	13,70 ‰	KCl	:	2,40 ‰
NaCl	:	12,40 ‰	NaCl	:	2,70 ‰
Insoluble	:	33,70 ‰	densité	:	1,027
densité	:	1,565			

Sachant que les dilutions relativement à l'eau prévues pour les boues sortant des différents étages sont les suivantes :

$$a_1 = 1,5503 \quad , \quad a_2 = 1,7506 \quad , \quad a_3 = 1,7872 \quad ,$$

déterminer les caractéristiques du lavage.

°
° °

Nous prendrons comme unité de masse, la tonne. Les débits massiques seront évalués en t/h et les quantités d'eau et de KCl aux différents étages du lavage, en tonnes par tonne d'insoluble. Enfin, les concentrations seront exprimées en tonnes de KCl par tonne d'eau (ou, ce qui revient au même, en g de KCl par g d'eau).

Les quantités d'eau et de KCl contenues dans les boues initiales par tonne d'insoluble sont égales à :

$$a_0 = \frac{40,20}{33,70} = 1,1929 \quad ; \quad b_0 = \frac{13,70}{33,70} = 0,4065$$

On a de même comme valeurs des concentrations en KCl de la solution d'imprégnation des boues initiales et de la solution de lavage :

$$\beta_0 = \frac{13,70}{40,20} = 0,3408 \quad ; \quad \beta_L = \frac{2,40}{94,90} = 0,0253$$

Le débit (t/h) d'insoluble lavé est :

$$T = 21,5 \times 1,565 \times 0,3370 = 11,339$$

On a d'autre part, comme débit total (t/h) d'eau introduite pour le lavage des boues sous forme de solution de lavage :

$$W = 25 \times 1,027 \times 0,949 = 24,366$$

d'où, pour la quantité d'eau (tonnes) utilisée par tonne d'insoluble :

$$L = \frac{W}{T} = \frac{24,366}{11,339} = 2,1489$$

On a par ailleurs, comme déséquilibre par excès du lavage relativement à l'eau :

$$\varepsilon = L - a_3 = 2,1489 - 1,7872 = 0,3617$$

et on en déduit pour les quantités d'eau par tonne d'insoluble dans les solutions clarifiées des différents effluents :

$$E_1 = a_0 + \varepsilon = 1,1929 + 0,3617 = 1,5546$$

$$E_2 = a_1 + \varepsilon = 1,5503 + 0,3617 = 1,9120$$

$$E_3 = a_2 + \varepsilon = 1,7506 + 0,3617 = 2,1123$$

On a de même pour les divers facteurs (k_i) :

$$k_1 = \frac{E_1}{a_0} = \frac{1,5546}{1,1929} = 1,3032 \quad ; \quad k_2 = \frac{E_2}{a_1} = \frac{1,9120}{1,5503} = 1,2333$$

$$k_3 = \frac{E_3}{a_2} = \frac{2,1123}{1,7506} = 1,2066 \quad ; \quad k_4 = \frac{L}{a_3} = \frac{2,1489}{1,7872} = 1,2024$$

et il en résulte, d'après la relation (55) :

$$K_1 = \frac{k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 - 1}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 - 1} = \frac{0,7893}{1,3318} = 0,5926 \quad ; \quad 1 - K_1 = 0,4074$$

$$K_2 = \frac{k_3 \cdot k_4 - 1}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 - 1} = \frac{0,4508}{1,3318} = 0,3385 \quad ; \quad 1 - K_2 = 0,6615$$

$$K_3 = \frac{k_4 - 1}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 - 1} = \frac{0,2024}{1,3318} = 0,1520 \quad ; \quad 1 - K_3 = 0,8480$$

On obtient alors pour les concentrations en KCl aux différents étages du lavage , à partir de la 1ère équation (57) :

$$\beta_1 = K_1 \cdot \beta_0 + (1 - K_1) \beta_L = 0,5926 \times 0,3408 + 0,4074 \times 0,0253 = 0,2123$$

$$\beta_2 = K_2 \cdot \beta_0 + (1 - K_2) \beta_L = 0,3385 \times 0,3408 + 0,6615 \times 0,0253 = 0,1321$$

$$\beta_3 = K_3 \cdot \beta_0 + (1 - K_3) \beta_L = 0,1520 \times 0,3408 + 0,8480 \times 0,0253 = 0,0733$$

et pour les quantités de KCl par tonne d'insoluble à ces mêmes étages, respectivement dans les boues épaissies et les solutions clarifiées :

$$b_1 = a_1 \beta_1 = 1,5503 \times 0,2123 = 0,3291 \quad ; \quad B_1 = E_1 \beta_1 = 1,5546 \times 0,2123 = 0,3300$$

$$b_2 = a_2 \beta_2 = 1,7506 \times 0,1321 = 0,2313 \quad ; \quad B_2 = E_2 \beta_2 = 1,9120 \times 0,1321 = 0,2526$$

$$b_3 = a_3 \beta_3 = 1,7872 \times 0,0733 = 0,1310 \quad ; \quad B_3 = E_3 \beta_3 = 2,1123 \times 0,0733 = 0,1548$$

$$B_L = L \beta_L = 2,1489 \times 0,0253 = 0,0545$$

On a comme compositions "utiles" en eau et KCl de la solution récupérée à l'effluent du premier laveur :

$$x'_1 = \frac{E_1}{E_1 + B_1} = \frac{1,5546}{1,5546 + 0,3300} = 0,8249 \quad ; \quad y'_1 = \frac{B_1}{E_1 + B_1} = \frac{0,3300}{1,5546 + 0,3300} = 0,1751$$

et comme compositions "utiles" en eau, KCl et insoluble des boues épaissies sortant du dernier laveur :

$$x_3 = \frac{a_3}{a_3 + b_3 + 1} = 0,6124 \quad ; \quad y_3 = \frac{b_3}{a_3 + b_3 + 1} = 0,0449 \quad ; \quad z_3 = \frac{1}{a_3 + b_3 + 1} = 0,3427$$

On obtiendrait de la même manière les compositions "utiles" des boues épaissies et des solutions clarifiées à tous les étages du système (+).

On a d'autre part, pour le flux net de KCl par tonne d'insoluble, d'après les équations (21) :

$$F = b_0 - B_1 = b_1 - B_2 = b_2 - B_3 = b_3 - B_L = 0,0765$$

Par ailleurs, le rendement de lavage proprement dit est, selon les équations (58) et (62), égal à :

$$R = \frac{E_1(\beta_1 - \beta_L)}{a_0(\beta_0 - \beta_L)} = \frac{1,5546(0,2134 - 0,0253)}{1,1929(0,3408 - 0,0253)} = k_1 \cdot K_1 = 1,3032 \times 0,5926 = 0,7724$$

ou 77,24 %

la perte correspondante étant :

$$P = 1 - R = 1 - 0,7724 = 0,2276 \quad \text{ou} \quad 22,76 \% .$$

On a de même pour la concentration relative de la solution récupérée, d'après les équations (60) et (62) :

$$P = \frac{\beta_1 - \beta_L}{\beta_0 - \beta_L} = \frac{0,2123 - 0,0253}{0,3408 - 0,0253} = K_1 = 0,5926 \quad \text{ou} \quad 59,26 \% .$$

D'après la lère des équations (68), la quantité de KCl récupérée par tonne d'insoluble : $R_{abs} = B_1 = 0,3300$ se décompose en une partie :

$R \cdot b_0 = 0,7724 \times 0,4065 = 0,3140$ provenant des boues initiales, et en une autre partie : $(E_1 - R a_0) \beta_L = (1,5546 - 0,7724 \times 1,1929) 0,0253 = 0,0314$ provenant de la solution de lavage.

De même, d'après la lère des équations (69), la quantité de KCl perdue par tonne d'insoluble : $P_{abs} = b_3 = 0,1310$ se décompose en une partie :

$P \cdot b_0 = 0,2276 \times 0,4065 = 0,0926$ provenant des boues initiales, et en une autre partie : $(a_3 - P a_0) \beta_L = (1,7872 - 0,2276 \times 1,1929) 0,0253 = 0,0384$ provenant de la solution de lavage.

(+) On pourrait pareillement, et avec les mêmes formules, calculer les concentrations et les quantités de NaCl aux différents étages du lavage à partir des concentrations y_0 et y_L en NaCl de la solution d'imprégnation des boues initiales et de la solution de lavage. On en déduirait alors aisément les compositions réelles des pulpes épaissies et des solutions clarifiées à ces mêmes étages.

La quantité horaire (tonnes) de KCl récupérée au total dans l'installation de lavage est égale à :

$$B_1 \cdot T = 0,3300 \times 11,339 = 3,742$$

la quantité horaire de KCl perdue au total étant de son côté égale à :

$$b_3 \cdot T = 0,1310 \times 11,339 = 1,485 .$$

b) Homogénéisation incomplète

Nous allons traiter le même exemple que pour l'homogénéisation complète, mais en supposant en outre, aux divers étages du lavage, les coefficients de dilution ci-après :

$$\sigma_1 = 0,9 \quad , \quad \sigma_2 = 0,8 \quad , \quad \sigma_3 = 0,7 .$$

°
° °

En remarquant qu'on a, d'après les équations (98) et (104) :

$$a'_p = \frac{a_p}{\sigma_p} \quad \text{et} \quad E'_p = a'_{p-1} + \varepsilon \quad (\text{avec en particulier } E'_1 = E_1) ,$$

on obtient les dilutions et effluents fictifs :

$$a'_1 = \frac{a_1}{\sigma_1} = \frac{1,5503}{0,9} = 1,7226 \quad ; \quad E'_1 = a_0 + \varepsilon = 1,1929 + 0,3617 = 1,5546 = E_1$$

$$a'_2 = \frac{a_2}{\sigma_2} = \frac{1,7506}{0,8} = 2,1882 \quad ; \quad E'_2 = a'_1 + \varepsilon = 1,7226 + 0,3617 = 2,0843$$

$$a'_3 = \frac{a_3}{\sigma_3} = \frac{1,7872}{0,7} = 2,5531 \quad ; \quad E'_3 = a'_2 + \varepsilon = 2,1882 + 0,3617 = 2,5499$$

$$E'_4 = L' = a'_3 + \varepsilon = 2,5531 + 0,3617 = 2,9148$$

et par suite les coefficients fictifs (k'_i) :

$$k'_1 = k_1 = \frac{E_1}{a_0} = \frac{1,5546}{1,1929} = 1,3032 \quad ; \quad k'_2 = \frac{E'_2}{a'_1} = \frac{2,0843}{1,7226} = 1,2100$$

$$k'_3 = \frac{E'_3}{a'_2} = \frac{2,5499}{2,1882} = 1,1653 \quad ; \quad k'_4 = \frac{L'}{a'_3} = \frac{2,9148}{2,5531} = 1,1417$$

On a par ailleurs, d'après l'équation (109) :

$$K'_1 = \frac{k'_2 \cdot k'_3 \cdot k'_4 - 1}{k_1 \cdot k'_2 \cdot k'_3 \cdot k'_4 - 1} = \frac{0,6100}{1,0980} = 0,5556 \quad ; \quad 1 - K'_1 = 0,4444$$

$$K'_2 = \frac{k'_3 \cdot k'_4 - 1}{k_1 \cdot k'_2 \cdot k'_3 \cdot k'_4 - 1} = \frac{0,3304}{1,0980} = 0,3009 \quad ; \quad 1 - K'_2 = 0,6991$$

$$K'_3 = \frac{k'_4 - 1}{k_1 \cdot k'_2 \cdot k'_3 \cdot k'_4 - 1} = \frac{0,1417}{1,0980} = 0,1292 \quad ; \quad 1 - K'_3 = 0,8708$$

et on en déduit pour les concentrations en KCl des solutions clarifiées aux différents étages, d'après la 1ère équation (108) :

$$\beta_1' = K_1' \cdot \beta_0 + (1 - K_1') \beta_L = 0,1893 + 0,0112 = 0,2005$$

$$\beta_2' = K_2' \cdot \beta_0 + (1 - K_2') \beta_L = 0,1025 + 0,0177 = 0,1202$$

$$\beta_3' = K_3' \cdot \beta_0 + (1 - K_3') \beta_L = 0,0440 + 0,0220 = 0,0660$$

On a de même, d'après l'équation (111) :

$$K_1'' = \frac{k_2 \cdot k_3' \cdot k_4' - 1}{k_1 \cdot k_2' \cdot k_3' \cdot k_4' - 1} = \frac{0,6409}{1,0980} = 0,5837 \quad ; \quad 1 - K_1'' = 0,4163$$

$$K_2'' = \frac{k_3 \cdot k_4' - 1}{k_1 \cdot k_2' \cdot k_3' \cdot k_4' - 1} = \frac{0,3776}{1,0980} = 0,3439 \quad ; \quad 1 - K_2'' = 0,6561$$

$$K_3'' = \frac{k_4 - 1}{k_1 \cdot k_2' \cdot k_3' \cdot k_4' - 1} = \frac{0,2024}{1,0980} = 0,1844 \quad ; \quad 1 - K_3'' = 0,8157$$

et on en déduit pour les concentrations en KCl des solutions d'imprégnation des boues épaissies aux différents étages, d'après la 1ère équation (110)

$$\beta_1'' = K_1'' \cdot \beta_0 + (1 - K_1'') \beta_L = 0,1989 + 0,0105 = 0,2094$$

$$\beta_2'' = K_2'' \cdot \beta_0 + (1 - K_2'') \beta_L = 0,1172 + 0,0166 = 0,1338$$

$$\beta_3'' = K_3'' \cdot \beta_0 + (1 - K_3'') \beta_L = 0,0629 + 0,0206 = 0,0835$$

Il en résulte pour les quantités de KCl par tonne d'insoluble aux différents étages, respectivement dans les boues épaissies et les solutions clarifiées :

$$b_1 = a_1 \beta_1'' = 1,5503 \times 0,2094 = 0,3246 \quad ; \quad B_1 = E_1 \beta_1' = 1,5546 \times 0,2005 = 0,3117$$

$$b_2 = a_2 \beta_2'' = 1,7506 \times 0,1338 = 0,2342 \quad ; \quad B_2 = E_2 \beta_2' = 1,9120 \times 0,1202 = 0,2298$$

$$b_3 = a_3 \beta_3'' = 1,7872 \times 0,0835 = 0,1493 \quad ; \quad B_3 = E_3 \beta_3' = 2,1123 \times 0,0660 = 0,1394$$

$$B_L = L \beta_L = 2,1489 \times 0,0253 = 0,0545$$

On a comme compositions "utiles" en eau et KCl de la solution récupérée à l'effluent du premier laveur :

$$x_1' = \frac{E_1}{E_1 + B_1} = \frac{1,5546}{1,5546 + 0,3117} = 0,8330 \quad ; \quad y_1' = \frac{B_1}{E_1 + B_1} = \frac{0,3117}{1,5546 + 0,3117} = 0,1670$$

et comme compositions "utiles" en eau, KCl et insoluble des boues épaissies sortant du dernier laveur :

$$x_3 = \frac{a_3}{a_3 + b_3 + l} = 0,6086 \quad ; \quad y_3 = \frac{b_3}{a_3 + b_3 + l} = 0,0508 \quad ; \quad z_3 = \frac{l}{a_3 + b_3 + l} = 0,3406$$

On obtiendrait de la même manière les compositions "utiles" des boues épaissies et des solutions clarifiées à tous les étages du système.

On a d'autre part, pour le flux net de KCl par tonne d'insoluble :

$$F = b_0 - B_1 = b_1 - B_2 = b_2 - B_3 = b_3 - B_L = 0,0948$$

Par ailleurs, le rendement de lavage proprement dit est, selon l'équation (92), égal à :

$$R = \frac{E_1(\beta'_1 - \beta_L)}{a_o(\beta_o - \beta_L)} = \frac{1,5546 (0,2005 - 0,0253)}{1,1929 (0,3408 - 0,0253)} = k_1 \cdot K'_1 = 1,3032 \times 0,5556 = 0,7241$$

la perte correspondante étant :

ou 72,41 %

$$P = 1 - R = 1 - 0,7241 = 0,2759 \text{ ou } 27,59 \% .$$

On a de même pour la concentration relative de la solution récupérée, d'après l'équation (94) :

$$\rho = \frac{\beta'_1 - \beta_L}{\beta_o - \beta_L} = \frac{0,2005 - 0,0253}{0,3408 - 0,0253} = K'_1 = 0,5556 \text{ ou } 55,56 \% .$$

La quantité horaire (tonnes) de KCl récupérée au total dans l'installation de lavage est égale à :

$$B_1 \cdot T = 0,3117 \times 11,339 = 3,534$$

la quantité horaire de KCl perdue au total étant de son côté égale à :

$$b_3 \cdot T = 0,1493 \times 11,339 = 1,693 .$$

On voit que le rendement de lavage, la concentration relative de la solution récupérée et la quantité horaire de KCl récupérée au total dans l'installation sont inférieurs à ce qu'ils étaient dans le cas de l'homogénéisation complète, ce qui est normal.

°
° °

C - METHODES GRAPHIQUES

Nous nous reportons au schéma du dispositif représenté sur la figure 1.

Les pulpes épaissies sont figurées par les lettres P , les solutions clarifiées par les lettres S , enfin les pulpes de mélange (résultant de l'addition, à chaque étage, des pulpes épaissies et des solutions clarifiées correspondantes, et supposées parfaitement homogènes) par les lettres M . Les lettres P et S sont affectées d'un indice égal au rang de l'étage d'où sortent les pulpes épaissies et les solutions clarifiées, et les lettres M d'un indice égal au rang de l'étage où entrent les pulpes de mélange considérées. Le liquide de lavage, constitué dans le cas général par une solution de concentration en soluté β_L , est représenté par les lettres S_{n+1} ou W .

D'une manière générale, la pulpe de mélange M_p , formée par la réunion de la pulpe épaissie P_{p-1} et de la solution clarifiée S_{p+1} , entre dans le laveur de rang p et se sépare en une pulpe épaissie P_p et une solution clarifiée S_p .

La pulpe épaissie P_p est caractérisée par les quantités a_p de solvant et b_p de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence, ou par les compositions en solvant, soluté et insoluble :

$$x_p = \frac{a_p}{a_p + b_p + i} \quad , \quad y_p = \frac{b_p}{a_p + b_p + i} \quad , \quad z_p = \frac{i}{a_p + b_p + i} \quad (114)$$

La solution clarifiée S_p est définie de son côté par les quantités E_p de solvant et B_p de soluté correspondant à la masse (i) d'insoluble, ou par les compositions en solvant et soluté :

$$x'_p = \frac{E_p}{E_p + B_p} \quad , \quad y'_p = \frac{B_p}{E_p + B_p} \quad (115)$$

La solution d'imprégnation de la pulpe P_p et la solution clarifiée S_p peuvent aussi être caractérisées par leurs concentrations en soluté, ces concentrations étant égales (β_p) lorsque, comme nous l'avons admis, on réalise à tous les étages une homogénéisation complète des pulpes épaissies et des solutions de lavage.

Quant au liquide de lavage S_{n+1} (ou W), il contient, toujours rapportées à la masse (i) d'insoluble, des quantités L de solvant et B_L de soluté (la quantité $B_L = L\beta_L$ étant nulle, en même temps que β_L , lorsque le liquide de lavage est constitué par du solvant pur).

Sur tous les diagrammes que nous serons amenés à utiliser lors de l'application des méthodes graphiques, nous conserverons aux différentes lettres la même signification que ci-dessus. Précisons que dans les méthodes graphiques faisant intervenir les compositions ou les quantités de solvant et de soluté associées, les lettres a , E , L représenteront toujours des masses de solvant rapportées à la masse (i) d'insoluble (alors que dans notre théorie algébrique du lavage, ces mêmes lettres

pouvaient représenter soit des volumes ou des masses de solution, soit des masses de solvant, par unité de masse d'insoluble).

°
° °

Parmi les méthodes graphiques qui peuvent être utilisées pour la résolution des problèmes de lavage des pulpes, nous nous limiterons aux trois suivantes, qui font respectivement intervenir ce que nous appelons les Compositions, les Quantités de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence, et les Concentrations.

1) Méthode fondée sur l'utilisation des Compositions sur le diagramme triangulaire

Rappelons qu'étant donnée une certaine quantité d'une pulpe P contenant les masses ou quantités absolues : (a_P) de solvant, (b_P) de soluté et (i) d'insoluble, nous pouvons caractériser la pulpe P par les trois grandeurs suivantes, appelées "compositions" (on dit encore : titres massiques ou fractions massiques), respectivement pour le solvant, le soluté et l'insoluble :

$$x_P = \frac{a_P}{a_P + b_P + i} \quad , \quad y_P = \frac{b_P}{a_P + b_P + i} \quad , \quad z_P = \frac{i}{a_P + b_P + i} \quad (116)$$

ces trois compositions étant liées par la relation :

$$x_P + y_P + z_P = 1 \quad (117)$$

Les compositions sont des variables homogènes faisant jouer aux trois constituants des rôles symétriques dans une masse de pulpe égale à l'unité.

La pulpe considérée constitue un système ternaire, qui est rendu bivariant lorsqu'on raisonne sur les compositions, du fait de la liaison existant entre ces grandeurs, et qui comporte alors deux degrés de liberté ou variables indépendantes. La constitution de la pulpe est donc entièrement déterminée dès l'instant que l'on se fixe deux compositions quelconques, la troisième étant obtenue par différence. Par exemple, si l'on se donne x_P et y_P on aura par là même : $z_P = 1 - x_P - y_P$.

Bien que les compositions utilisées pour la caractérisation des pulpes soient des grandeurs essentiellement scalaires, nous adopterons cependant un principe de représentation vectorielle, très commode pour le raisonnement. En conséquence, nous nous donnerons deux axes rectangulaires concourant au point O : $x'Ox$ (axe du solvant), $y'Oy$ (axe du soluté), sur chacun desquels nous choisirons arbitrairement deux vecteurs unitaires $\vec{u}_x$ et $\vec{u}_y$ (fig. 3). Le point P, extrémité du vecteur $\vec{OP}$ tel que :

$$\vec{OP} = x_P \cdot \vec{u}_x + y_P \cdot \vec{u}_y \quad (118)$$

sera appelé point représentatif (ou figuratif) de la pulpe P (+).

(+) Le vecteur $\vec{OP}$ est évidemment tout aussi caractéristique de l'état de la pulpe P que le point P lui-même.

Les quantités x_P , y_P et z_P étant par nature des grandeurs positives au plus égales à l'unité, la région du plan xOy utile pour la représentation d'une pulpe donnée (+) se limite à la surface du triangle OAB (diagramme triangulaire) tel que $\overrightarrow{OA} = \overrightarrow{u_x}$ et $\overrightarrow{OB} = \overrightarrow{u_y}$. On traduira ce fait en disant que la représentation au moyen des compositions est une représentation fermée.

Ainsi, les compositions en solvant et en soluté de la pulpe P ne sont autres que les coordonnées classiques x_P et y_P du point P . Quant à la composition relative au troisième constituant, l'insoluble, sa valeur est donnée graphiquement par les longueurs des segments Pc ou Pd , c'est-à-dire par la distance du point P à l'hypoténuse du triangle, mesurée dans une direction parallèle à l'un ou à l'autre des deux axes Ox et Oy avec l'unité de longueur correspondante.

Par ailleurs, chaque sommet du triangle représente un constituant pur dont il porte le nom : A (Solvant) ; B (Soluté) ; O (Insoluble). De même, un point quelconque d'un côté du triangle représente un mélange des deux seuls constituants figurant aux extrémités de ce côté. C'est ainsi qu'un point S de l'hypoténuse AB est représentatif d'un mélange formé uniquement de solvant et de soluté, donc dépourvu d'insoluble. D'autre part, une droite du triangle telle que $A'B'$, parallèle à AB , représente des pulpes ayant une composition en insoluble constante.

Les droites telles que AR , BQ , OS , issues des trois sommets du triangle, jouissent également de propriétés intéressantes (fig.4). Elles représentent des pulpes pour lesquelles les rapports (Soluté/Insoluble), (Solvant/Insoluble) et (Soluté/Solvant) sont respectivement constants (on voit que ne figure pas, dans les rapports considérés, le constituant correspondant au sommet dont la droite est issue). En d'autres termes, une droite telle que AR représentera des pulpes contenant, par unité de masse d'insoluble, la même quantité de soluté. De même, une droite telle que BQ représentera des pulpes renfermant, par unité de masse d'insoluble, la même quantité de solvant.

Les droites telles que $A'B'$ ou telles que BQ (fig.3 et 4) représentent ce que, dans notre terminologie, nous appelons des pulpes à équi-épaississement (pulpes contenant, par unité de masse d'insoluble, des masses égales de solution ou de solvant).

Une solution saturée en soluté ayant une composition figurée par le point T de l'hypoténuse du triangle OAB , les points figuratifs des différentes solutions clarifiées (saturée ou insaturées) constituant l'effluent d'un décanteur-laveur ne pourront être situés que sur le segment AT du côté AB (fig.5). La droite OT représentera les pulpes formées de tous les mélanges possibles d'insoluble et de solution saturée. Le triangle OAT représentera de son côté les pulpes constituées par des mélanges d'insoluble et de solutions non saturées (c'est-à-dire les pulpes dans lesquelles la totalité du soluté est à l'état de solution). Les droites du triangle OAT telles que OS , qui correspondent à des pulpes à équi-concentration en soluté, joueront un rôle particulièrement important dans les opérations de lavage ; les points de l'une quelconque de ces droites, quand on va de S vers O , sont représentatifs des états successifs d'une pulpe au cours de son épaississement. Enfin,

(+) Il s'agit bien entendu ici d'une pulpe réelle (ou utile) ayant une existence physique. Nous serons en effet amenés ultérieurement, lors des constructions graphiques, à considérer des pulpes fictives, pour lesquelles le point figuratif ("point de sous-traction" Δ) pourra être situé à l'extérieur du triangle OAB .

le triangle OBT représentera les pulpes formées par des mélanges d'insoluble, de soluté indissous et de solution saturée (c'est-à-dire les pulpes dans lesquelles une partie du soluté est à l'état solide).

Nous allons maintenant examiner la question du mélange de deux pulpes, sur un tel diagramme triangulaire. Supposons qu'à une masse m_P d'une pulpe (ou d'une solution) représentée par un point P (ou un vecteur $\overrightarrow{OP}$) on ajoute une masse m_N d'une pulpe (ou d'une solution) représentée par un point N. La pulpe résultante (ou pulpe de mélange) a comme compositions en solvant et soluté :

$$x_M = \frac{m_P \cdot x_P + m_N \cdot x_N}{m_P + m_N}, \quad y_M = \frac{m_P \cdot y_P + m_N \cdot y_N}{m_P + m_N} \quad (119)$$

de sorte que le point figuratif M de cette pulpe de mélange (ou point d'addition), situé à l'intérieur du triangle OAB, correspond à l'équation vectorielle :

$$\overrightarrow{OM} = \frac{m_P \cdot x_P + m_N \cdot x_N}{m_P + m_N} \overrightarrow{u_x} + \frac{m_P \cdot y_P + m_N \cdot y_N}{m_P + m_N} \overrightarrow{u_y} \quad (120)$$

On en déduit :

$$\begin{aligned} (m_P + m_N) \cdot \overrightarrow{OM} &= (m_P \cdot x_P + m_N \cdot x_N) \overrightarrow{u_x} + (m_P \cdot y_P + m_N \cdot y_N) \overrightarrow{u_y} \\ &= m_P \cdot (x_P \cdot \overrightarrow{u_x} + y_P \cdot \overrightarrow{u_y}) + m_N \cdot (x_N \cdot \overrightarrow{u_x} + y_N \cdot \overrightarrow{u_y}) \end{aligned}$$

ou :

$$(m_P + m_N) \cdot \overrightarrow{OM} = m_P \cdot \overrightarrow{OP} + m_N \cdot \overrightarrow{ON} \quad (121)$$

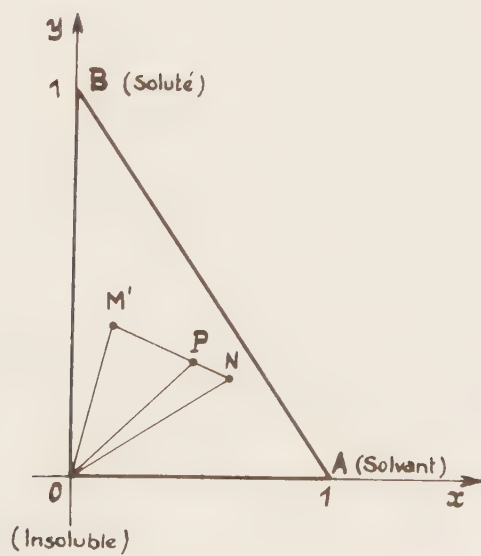
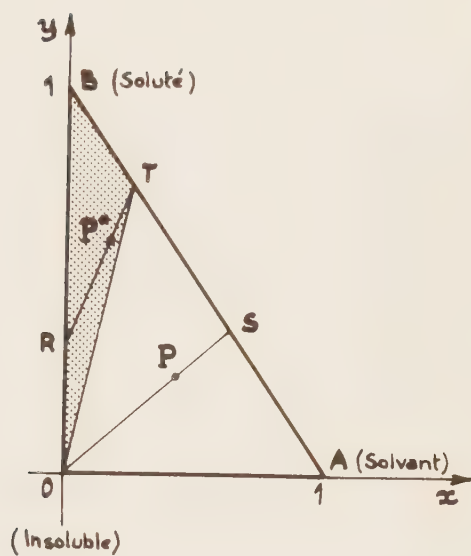
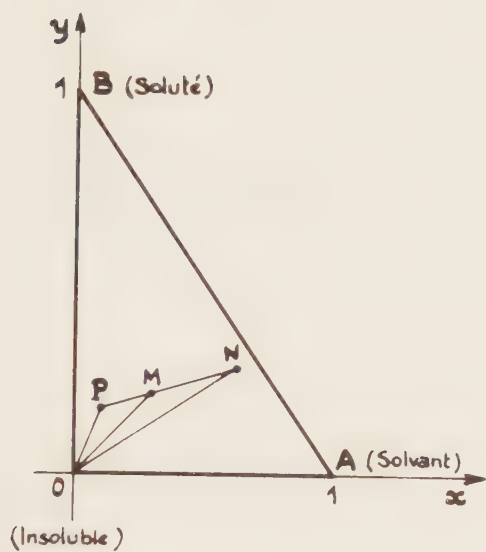
ou encore, en remarquant que $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PM} = \overrightarrow{ON} + \overrightarrow{NM}$:

$$m_P \cdot \overrightarrow{MP} + m_N \cdot \overrightarrow{MN} = \mathbf{O} \quad (122)$$

Cette dernière relation montre que les points P, N, M sont alignés et que le point M est situé entre les points P et N, le plus près du point représentatif de la pulpe qui est en plus grande quantité (fig.6). En particulier, si les masses des deux pulpes composantes P et N sont égales, le point figuratif M de la pulpe résultante est au milieu du segment PN.

Inversement, étant donnée une pulpe M, on peut toujours la considérer comme résultant du mélange d'une pulpe P et d'une pulpe N, les points P et N étant alignés avec le point M et situés dans le triangle OAB, et les masses respectives des deux pulpes composantes étant telles que la relation (122) soit satisfaite. C'est ainsi en particulier qu'une pulpe représentée par un point quelconque P du triangle OAT (fig.7) peut être considérée comme résultant du mélange d'une phase solide représentée par le point O (insoluble pur) et d'une phase liquide représentée par le point S (solution insaturée). Pareillement, une pulpe représentée par un point quelconque P* du triangle OBT (d'une manière générale, l'astérisque affectant une lettre P indique qu'une partie du soluté contenu dans la pulpe correspondante est à l'état solide ou indissous) peut être considérée comme résultant du mélange d'une phase liquide représentée par le point T (solution saturée) et d'une phase solide représentée par le point R (composée à la fois d'insoluble et de soluté indissous).

L'expression (122) de la règle des mélanges s'applique bien entendu à la soustraction, à condition de considérer la masse de la pulpe soustraite comme une quantité algébrique négative. Ainsi, si une certaine masse de pulpe N est soustraite d'une autre masse de pulpe P, le point figuratif M' de la pulpe restante



(ou point de soustraction) sera situé sur le prolongement de la droite NP (fig.8). Mais alors que le point d'addition de deux pulpes réelles correspond à une pulpe réelle et est en conséquence obligatoirement situé à l'intérieur du triangle OAB, un point de soustraction peut par contre correspondre à une pulpe fictive et se trouver par suite à l'extérieur du triangle OAB. Une telle éventualité se produit lorsque l'opération de soustraction revient à retirer d'une pulpe une quantité de constituant supérieure à celle réellement contenue dans cette pulpe.

°
° °

Nous désignons ici par ε strictement le déséquilibre du lavage relativement au solvant, donné par les relations (15). Nous continuons de représenter par F le flux net de soluté (nous supposons pour le moment que la totalité du soluté est à l'état de solution dans la pulpe initiale), exprimé par les équations (21), le flux F se réduisant au flux du soluté perdu $\mathcal{F} = b_n$ lorsque le liquide de lavage est constitué par du solvant pur ($\beta_L = 0$). Enfin, nous rappelons les formules $E_p = a_{p-1} + \varepsilon$ et $B_p = b_{p-1} - F$.

Nous raisonnons sur un diagramme triangulaire classique, avec les deux axes rectangulaires $x'Ox$ et $y'Oy$ de vecteurs unitaires $\vec{u}_x$ et $\vec{u}_y$ (fig.9).

Si de la pulpe épaissie quittant le laveur de rang $(p-1)$ et entrant dans le laveur de rang p (de masse égale à : $a_{p-1} + b_{p-1} + i$), dont le point représentatif P_{p-1} est déterminé par l'équation vectorielle :

$$\overrightarrow{OP_{p-1}} = \frac{a_{p-1}}{a_{p-1} + b_{p-1} + i} \vec{u}_x + \frac{b_{p-1}}{a_{p-1} + b_{p-1} + i} \vec{u}_y \quad (123)$$

on soustrait la solution clarifiée sortant à l'effluent du laveur de rang p (de masse égale à : $E_p + B_p = a_{p-1} + \varepsilon + b_{p-1} - F$), représentée par le point S_p tel que :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OS_p} &= \frac{E_p}{E_p + B_p} \vec{u}_x + \frac{B_p}{E_p + B_p} \vec{u}_y \\ &= \frac{a_{p-1} + \varepsilon}{a_{p-1} + \varepsilon + b_{p-1} - F} \vec{u}_x + \frac{b_{p-1} - F}{a_{p-1} + \varepsilon + b_{p-1} - F} \vec{u}_y \end{aligned} \quad (124)$$

on aboutit à un "point de soustraction" Δ , aligné avec les points S_p et P_{p-1} , et on doit avoir (la masse correspondante étant la différence des masses précédentes, soit $-\varepsilon + F + i$) :

$$(-\varepsilon + F + i) \overrightarrow{O\Delta} = (a_{p-1} + b_{p-1} + i) \overrightarrow{OP_{p-1}} - (a_{p-1} + \varepsilon + b_{p-1} - F) \overrightarrow{OS_p} \quad (125)$$

Pour trouver les coordonnées δ_x et δ_y du point Δ (c'est-à-dire les compositions en solvant et en soluté de la pulpe fictive représentée par ce point), il suffit de projeter sur les axes de coordonnées les vecteurs de l'équation (125).

On a ainsi, en projetant sur l'axe des x :

$$\begin{aligned} (-\varepsilon + F + i) \delta_x \cdot \vec{u}_x &= (a_{p-1} + b_{p-1} + i) \frac{a_{p-1}}{a_{p-1} + b_{p-1} + i} \vec{u}_x \\ &\quad - (a_{p-1} + \varepsilon + b_{p-1} - F) \frac{a_{p-1} + \varepsilon}{a_{p-1} + \varepsilon + b_{p-1} - F} \vec{u}_x \end{aligned}$$

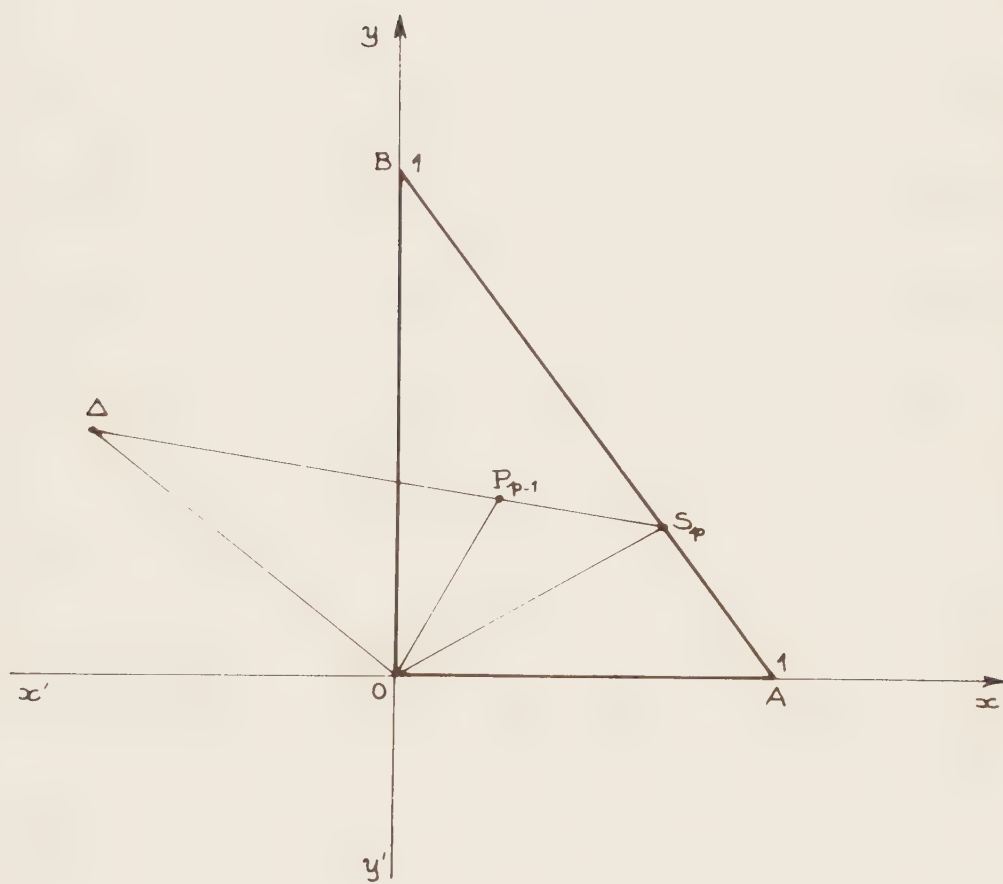


Fig. 9

ou :

$$(-\varepsilon + F + i) \delta_x \cdot \vec{u}_x = -\varepsilon \cdot \vec{u}_x \quad (126)$$

On a de même, en projetant sur l'axe des y :

$$(-\varepsilon + F + i) \delta_y \cdot \vec{u}_y = F \cdot \vec{u}_y \quad (127)$$

1°) En supposant $-\varepsilon + F + i \neq 0$ ou $\varepsilon \neq F + i$, on obtient (+) :

$$\left. \begin{aligned} \delta_x &= \frac{-\varepsilon}{-\varepsilon + F + i} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - (F + i)} \\ \delta_y &= \frac{F}{-\varepsilon + F + i} = \frac{-F}{\varepsilon - (F + i)} \end{aligned} \right\} \quad (128)$$

Les coordonnées δ_x et δ_y étant indépendantes du rang p de l'étage considéré, le point Δ est un point fixe pour l'ensemble du système.

Le résultat constitué par les formules (128) est logique, car la pulpe fictive représentée par le point Δ est bien formée (compte tenu de nos conventions de signes) des quantités $(-\varepsilon)$ de solvant, (F) de soluté et (i) d'insoluble.

2°) Le cas $-\varepsilon + F + i = 0$ ou $\varepsilon = F + i$ doit être étudié directement à partir des équations de base.

Cherchons à cet effet la direction du vecteur $\vec{P_{p-1}S_p}$. Nous avons :

$$\begin{aligned} \vec{P_{p-1}S_p} &= \vec{OS_p} - \vec{OP_{p-1}} = \frac{a_{p-1} + \varepsilon}{a_{p-1} + \varepsilon + b_{p-1} - F} \vec{u}_x + \frac{b_{p-1} - F}{a_{p-1} + \varepsilon + b_{p-1} - F} \vec{u}_y \\ &\quad - \frac{a_{p-1}}{a_{p-1} + b_{p-1} + i} \vec{u}_x - \frac{b_{p-1}}{a_{p-1} + b_{p-1} + i} \vec{u}_y \end{aligned}$$

d'où, en faisant $\varepsilon - F = i$:

$$\vec{P_{p-1}S_p} = \frac{1}{a_{p-1} + b_{p-1} + i} [\varepsilon \cdot \vec{u}_x - F \cdot \vec{u}_y] \quad (129)$$

Les vecteurs $\vec{P_0S_1}$, $\vec{P_1S_2}$, ..., $\vec{P_nS_{n+1}}$ sont parallèles au vecteur :

$$\vec{OV} = \varepsilon \cdot \vec{u}_x - F \cdot \vec{u}_y \quad (130)$$

Le cas $\varepsilon = F + i$ correspond physiquement, avec nos conventions de signes, à un flux net global de matière nul.

°
° °

Nous allons maintenant examiner rapidement la question du lieu du point Δ .

En posant, pour simplifier l'écriture, $\delta_x = x$ et $\delta_y = y$, on a comme expression des coordonnées du point Δ :

$$x = \frac{-\varepsilon}{-\varepsilon + F + i} \quad , \quad y = \frac{F}{-\varepsilon + F + i} \quad (131)$$

(+) La composition en insoluble de la pulpe fictive représentée par le point Δ serait de même égale à $\frac{i}{-\varepsilon + F + i} = \frac{-1}{\varepsilon - (F + i)}$.

D'après les résultats établis dans la partie algébrique de notre étude, nous savons que le déséquilibre ε du lavage (négatif, nul ou positif) peut varier de $-a_n$ à $+\infty$ (en prenant notamment les valeurs successives croissantes : $-a_n$, 0 , i , $+\infty$). En ce qui concerne le flux net de soluté, on a toujours $\mathcal{F} > 0$, avec $0 < \mathcal{F} < b_o$, pour le lavage au solvant pur, que ε soit négatif, nul ou positif. Dans le cas du lavage avec une solution, le flux F peut par contre, et suivant les conditions, être positif, nul ou même négatif (en pouvant prendre en particulier les valeurs successives croissantes : $-\infty$, $-i$, 0 , b_o), de sorte qu'on a alors $-\infty < F < b_o$. L'éventualité $F > 0$ reste cependant la plus probable pour une installation de fonctionnement normal. On ne peut d'ailleurs avoir $F \leq 0$ que si $\varepsilon > 0$, la condition $\varepsilon \leq 0$ entraînant obligatoirement $F > 0$.

On peut obtenir la position du point Δ en discutant directement les équations (131), suivant les valeurs de ε et de F , et en tenant compte des observations qui viennent d'être formulées.

La recherche du lieu du point Δ peut être facilitée par les considérations suivantes.

Nous savons que la pulpe initiale P_o peut être lavée de différentes manières, de sorte que si pour un mode de lavage précis, ε et F se trouvent liés par les équations du lavage, il n'en reste pas moins que pour une valeur donnée de ε il est possible d'avoir des valeurs différentes de F (et inversement) en choisissant d'autres conditions de lavage. En d'autres termes, l'insoluble (i) étant supposé invariant, les coordonnées x et y du point Δ peuvent être considérées comme des fonctions des deux paramètres indépendants ε et F .

En éliminant ε entre les équations (131), on obtient :

$$y = \frac{-F}{F+i} (x-1) \quad (132)$$

et on voit que pour $F = \text{Cte}$, le point Δ se trouve sur la droite D_A représentative de l'équation (132), passant, quelle que soit la valeur de F , par le point A ($x=1$, $y=0$), de coefficient directeur $-F/(F+i)$, et coupant l'axe des y en un point J d'ordonnée $y_J = F/(F+i)$.

On a de même, en éliminant F entre les équations (131) :

$$y = \frac{i-\varepsilon}{\varepsilon} x + 1 \quad (133)$$

et on voit que pour $\varepsilon = \text{Cte}$, le point Δ se trouve sur la droite D_B représentative de l'équation (133), passant, quelle que soit la valeur de ε , par le point B ($x=0$, $y=1$), de coefficient directeur $(i-\varepsilon)/\varepsilon$, et coupant l'axe des x en un point I d'ordonnée $y_I = \varepsilon/(\varepsilon-i)$.

Le point Δ se trouvant à la fois sur la droite D_A et sur la droite D_B est donc, pour les différentes valeurs compatibles de F et de ε , à l'intersection de ces deux droites (fig. 10).

La détermination de l'ordonnée y_J du point d'intersection de la droite D_A avec l'axe des y rend plus aisée la discussion du lieu du point Δ effectuée directement à partir des équations (131).

On peut aussi, en supposant que les vecteurs unitaires $\vec{u}_x$ et $\vec{u}_y$ choisis sur les deux axes de coordonnées ont la même longueur, donc que le triangle rectangle OAB est isocèle, discuter les valeurs des coefficients directeurs $-F/(F+i)$

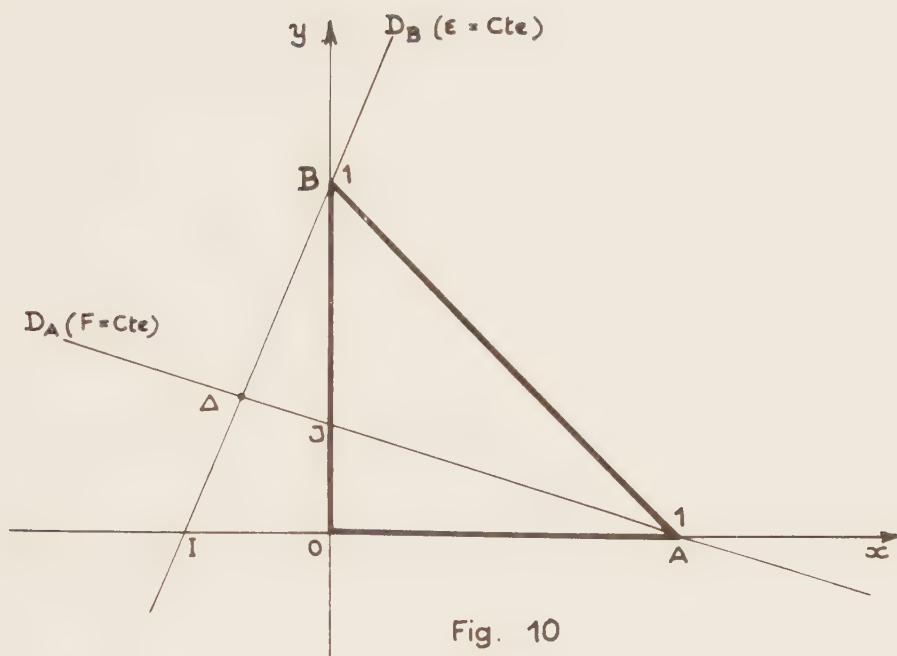


Fig. 10

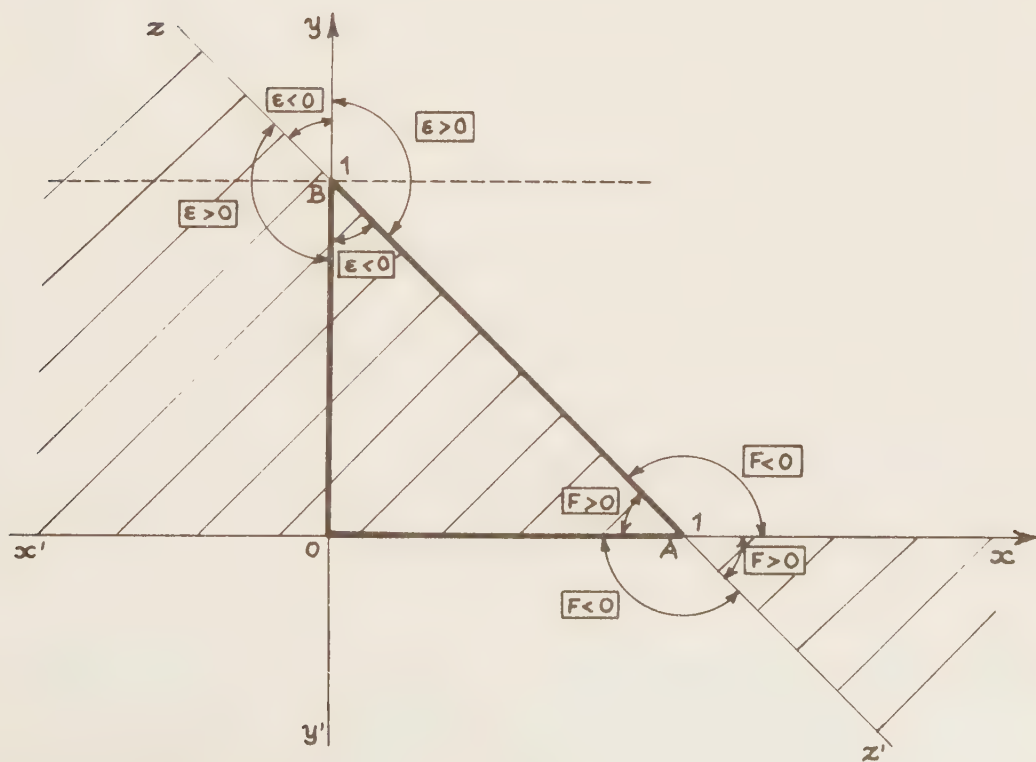


Fig. 11

et $(i - \varepsilon)/\varepsilon$ des droites D_A et D_B , qui sont alors égaux aux pentes de ces droites (+). Cette discussion permet de déterminer très rapidement les régions angulaires relatives aux différents signes de ε et de F (ε étant nul sur l'axe des y et F nul sur l'axe des x) et par suite celles où le point Δ a la possibilité de se trouver (fig. 11).

Dans le cas où $F > 0$ (cas le plus important puisqu'il correspond au lavage au solvant pur et qu'il est généralement réalisé pour le lavage avec une solution), étant donné que ε est susceptible de prendre n'importe quelle valeur, le point Δ peut se trouver dans toute la zone hachurée de la figure 11. Il est en particulier situé dans le triangle OAB lorsque $\varepsilon \leq 0$.

Dans le cas où $F < 0$, on a nécessairement $\varepsilon > 0$, et par suite les régions pour lesquelles $\varepsilon \leq 0$ doivent être exclues. Il en résulte que le point Δ ne peut se trouver dans les régions yBz et $y'OAz'$. Il peut par contre occuper n'importe quelle position à l'intérieur des régions $xABy$ et $x'Oy'$ du plan de référence (fig. 11).

Ajoutons que lorsque $\varepsilon = F + i$, les coefficients directeurs des deux droites D_A et D_B deviennent égaux à $-F/\varepsilon$ et par suite les droites en question sont parallèles : le point Δ est rejeté à l'infini.

La discussion complète du lieu du point Δ est résumée sur la figure 12. Il apparaît qu'en définitive le point Δ peut être situé dans tout le plan de référence défini par les axes $x'Ox$ et $y'Oy$, à l'exception des régions yBz et $y'OAz'$.

On voit d'autre part que le point Δ se trouve dans le triangle OAB - c'est-à-dire que la pulpe fictive représentée par ce point a une composition réelle - si, et seulement si, $\varepsilon \leq 0$.

On peut expliquer ce résultat de la manière ci-après.

La pulpe fictive Δ caractérisée par les quantités $(-\varepsilon, F, i)$, s'obtient en soustrayant de la pulpe P_{p-1} caractérisée par les quantités (a_{p-1}, b_{p-1}, i) , la solution S_p caractérisée par les quantités $(E_p, B_p, 0)$, soit :

$$\text{Pulpe fictive } \Delta = \text{Pulpe réelle } P_{p-1} - \text{Solution } S_p$$

d'où les bilans suivants :

$$\begin{array}{lll} \text{Solvant} & : & -\varepsilon = a_{p-1} - E_p \quad (\text{avec } E_p = a_{p-1} + \varepsilon) \\ \text{Soluté} & : & F = b_{p-1} - B_p \\ \text{Insoluble} & : & i = i - 0 \end{array}$$

Deux cas peuvent dès lors se présenter :

1) $\varepsilon \leq 0$. On a $E_p = (a_{p-1} + \varepsilon) \leq a_{p-1}$ et par suite la différence $-\varepsilon = a_{p-1} - E_p$ est positive ou nulle. Nous savons qu'il en est obligatoirement de même de la différence $F = b_{p-1} - B_p$. La pulpe fictive Δ aura dans ce cas une composition réelle.

2) $\varepsilon > 0$. On a $E_p = (a_{p-1} + \varepsilon) > a_{p-1}$ et par suite la différence $-\varepsilon = a_{p-1} - E_p$ est négative, de sorte que l'opération de soustraction revient à retirer de la pulpe P_{p-1} une quantité de solvant supérieure à celle qu'elle contient. D'autre part, il est alors possible que l'on ait aussi $B_p > b_{p-1}$, c'est-à-dire que la différence $F = b_{p-1} - B_p$ soit négative, ce qui reviendrait à soustraire de la pulpe P_{p-1} une quantité de soluté supérieure à celle contenue dans cette pulpe. En conséquence, du fait du solvant

(+) Le coefficient directeur d'une droite D n'est en effet égal à la pente de cette droite - c'est-à-dire à la tangente trigonométrique de l'angle que la droite fait avec Ox - que dans le cas d'axes rectangulaires et de vecteurs unitaires de même longueur.

En fait, les résultats de notre discussion sont directement transposables au cas où les vecteurs unitaires sur les axes ont des longueurs différentes.

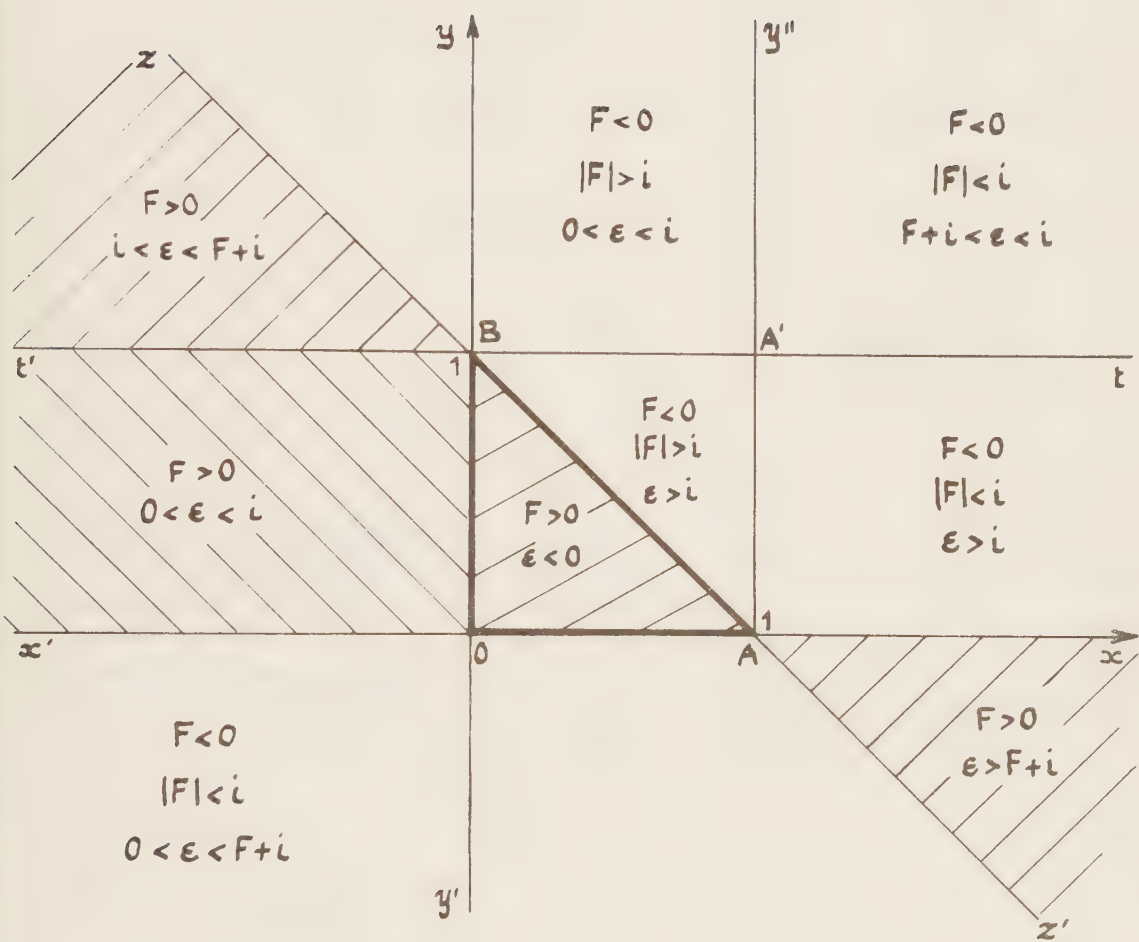


Fig. 12

et éventuellement aussi du soluté, la pulpe fictive Δ aura dans ce cas une composition également fictive.

On voit qu'en définitive la pulpe fictive Δ n'a de composition réelle que lorsque les trois flux de solvant, de soluté et d'insoluble sont tous trois dirigés dans le sens d'écoulement de la pulpe soumise au lavage (le flux de solvant pouvant, à la limite, être nul).

°
° °

Le principe de la méthode graphique fondée sur l'utilisation des compositions et appliquée à la résolution des problèmes de lavage est le suivant :

On suppose que sur le diagramme triangulaire (fig. 13) on a tracé (a priori ou à partir de données expérimentales) la courbe P_0Q , lieu des points figuratifs $P_0, P_1, P_2, \dots$ des pulpes épaissies successives obtenues au cours du lavage (+). On se propose de déterminer le nombre d'étages nécessaire pour que la teneur en soluté de la pulpe résiduelle soit égale à une valeur fixée. On connaît donc les compositions de la pulpe initiale P_0 , de la pulpe finale désirée P_n et du liquide de lavage S_{n+1} (ou W), de même que la quantité L (exprimée en solvant) de liquide de lavage utilisée (++)). La constitution de la solution clarifiée S_1 passant à l'effluent du premier laveur peut alors être obtenue à partir du bilan de matière global de l'installation, puisqu'on a, respectivement pour le solvant et le soluté, les équations : $a_0 + L = a_n + E_1$ et : $b_0 + B_L = b_n + B_1$. D'après ce qui précède, le "point de soustraction" Δ se trouve à l'intersection des droites $S_{n+1}P_n$ et S_1P_0 . On opère alors comme suit. Le point figuratif de la pulpe P_1 , qui doit se trouver à la fois sur la courbe P_0Q et sur la droite OS_1 (la pulpe P_1 et la solution S_1 ont en effet le même rapport Soluté/Solvant et par suite les points S_1 et P_1 sont alignés avec l'origine), est donc à leur intersection. Le prolongement de la droite ΔP_1 détermine à son tour le point S_2 , dont on déduit le point P_2 , et ainsi de suite. On continue jusqu'à l'obtention d'une pulpe dont le point figuratif est confondu avec P_n ou à défaut situé immédiatement au-dessous, ce qui détermine le nombre d'étages nécessaire. Ainsi, dans l'exemple représenté sur la figure 13, le point P_n est encadré par les points P_3 et P_4 , et l'installation devra en conséquence comporter 4 étages de lavage. Dans ce cas, la pulpe finale P_4 sera un peu mieux épuisée et la solution récupérée S_4 un peu plus riche qu'il n'était prévu. On pourra alors diminuer progressivement la quantité de liquide de lavage (ce qui reviendra à déplacer le point Δ et par suite le point S_1), jusqu'à ce que le point P_4 coïncide avec le point P_n . Les nouvelles conditions du lavage permettront alors d'atteindre exactement la teneur fixée pour la pulpe finale. La construction graphique donnera en même temps, d'une manière très simple, les compositions de toutes les pulpes épaissies et solutions clarifiées intermédiaires.

On peut aussi, pour déterminer le nombre d'étages de lavage, opérer "à reculs" en partant de la pulpe P_n (fig. 14). Le prolongement de la droite OP_n donne le point S_n . Le point P_{n-1} se trouve à son tour à l'intersection de la courbe P_0Q

(+) La courbe P_0Q serait une droite passant par le sommet B du triangle OAB si le lavage était, selon notre terminologie, à équi-épaississement par rapport au solvant (le rapport Solvant/Insoluble étant alors constant pour toutes les pulpes). La courbe P_0Q serait une droite parallèle à l'hypoténuse AB si le lavage était à équi-épaississement par rapport aux masses de solution (les différentes pulpes contenant alors, par unité de masse d'insoluble, des masses égales de solution, c'est-à-dire étant des pulpes à masse constante).

(++) Si le liquide de lavage était constitué par du solvant pur, son point figuratif

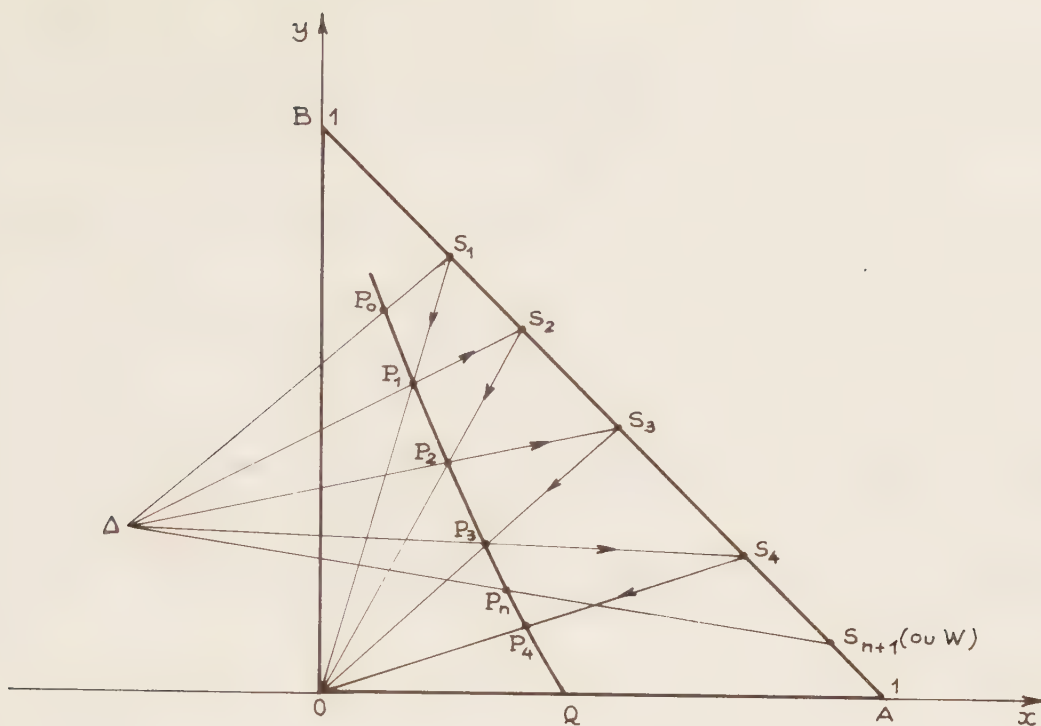


Fig. 13

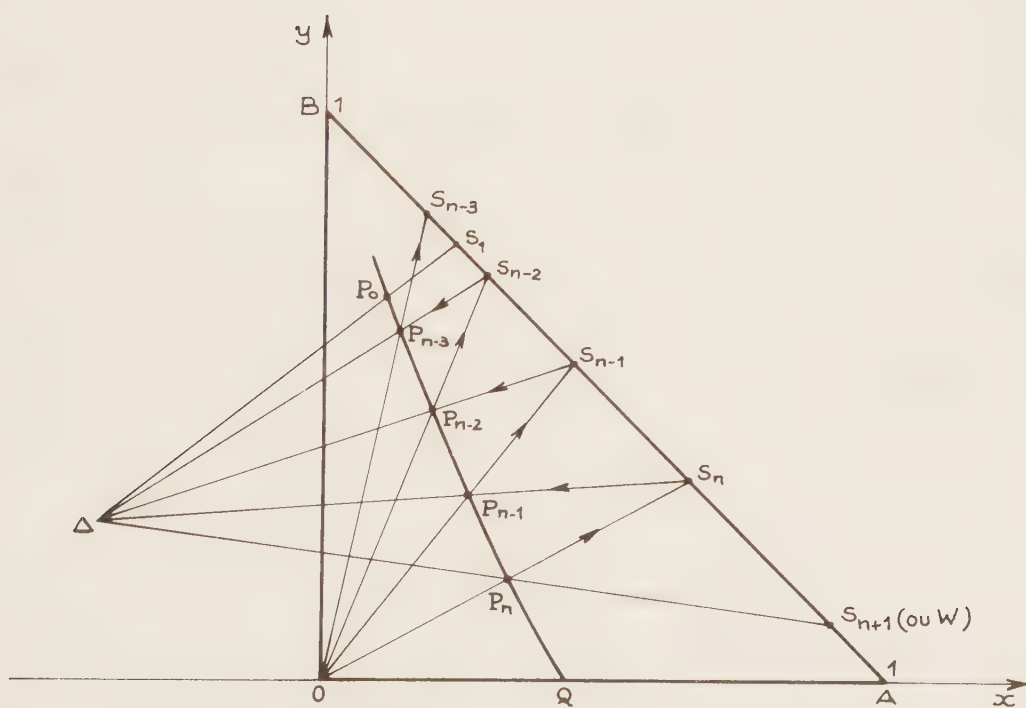


Fig. 14

avec la droite $S_n\Delta$, et ainsi de suite. On continue jusqu'à ce qu'on obtienne une solution clarifiée dont le point figuratif soit confondu avec S_1 ou à défaut situé immédiatement au-dessus. Ainsi, dans l'exemple de la figure 14, le point S_1 est encadré par les points S_{n-2} et S_{n-3} , et il faut donc 4 étages de lavage.

Au lieu de se donner la pulpe finale P_n et en déduire la solution récupérée S_1 , on peut évidemment, à l'inverse, se donner la solution récupérée et en déduire la pulpe finale.

Les cas des figures 13 et 14, où le point Δ est à l'extérieur du triangle OAB, correspondent à un lavage déséquilibré par excès relativement au solvant ($\varepsilon > 0$, avec $\varepsilon \neq F + i$).

Le cas de la figure 15, où le point Δ est à l'intérieur du triangle OAB, se rapporte par contre à un lavage déséquilibré par défaut relativement au solvant ($\varepsilon < 0$). On voit qu'il serait alors nécessaire d'avoir 7 étages de lavage (+).

Enfin le cas $\varepsilon = F + i$, où le point Δ est rejeté à l'infini, est représenté sur la figure 16. Dans l'exemple considéré, l'installation devrait comporter 3 étages de lavage.

°
° °

Nous avons jusqu'ici supposé implicitement que la totalité du soluté contenu dans la pulpe initiale était à l'état de solution. Nous allons maintenant examiner, sur le diagramme triangulaire classique des compositions, le cas où une partie du soluté s'y trouve à l'état solide ou indissous. Le point figuratif P_0^* de la pulpe initiale est alors situé à l'intérieur du triangle OBT, le point T de l'hypoténuse AB représentant une solution saturée en soluté (fig. 17). Le point figuratif S_1 de la solution clarifiée passant à l'effluent du premier laveur ne pourra donc être situé que sur le segment AT de AB. Si la quantité L de liquide de lavage utilisée est telle que le point S_1 soit situé au-dessous de T (solution récupérée non saturée), le problème se ramène au cas du lavage à solubilisation initiale complète correspondant, déjà envisagé.

Nous allons donc étudier le cas où le point S_1 est confondu avec le point T, c'est-à-dire où la solution récupérée est une solution saturée (celle-ci étant obtenue avec un nombre fini d'étages, la récupération de soluté correspondante étant la récupération maximale compatible avec la quantité de liquide de lavage utilisée). Il restera en général, dans ce cas, du soluté non dissous dans la pulpe épaissie sortant du premier laveur et l'expression du flux net de soluté sera alors donnée par les équations (89). Le point Δ est situé à l'intersection des droites $S_{n+1}P_n$ et TP_0^* . En opérant "à reculons", c'est-à-dire en partant de la pulpe finale P_n , on aboutit finalement à une pulpe P_{n-3}^* du triangle OBT telle que le point fictif S_{n-3}^* obtenu en prolongeant la droite OP_{n-3}^* jusqu'à son intersection avec AB, est situé au-dessus de T. En conséquence, dans l'exemple de la figure 17, il faudrait 4 étages de lavage. La construction graphique donne en même temps les compositions de toutes les pulpes épaissies et solutions clarifiées intermédiaires. Si la composition de la pulpe initiale P_0^* ou celle de la pulpe finale désirée P_n avaient été légèrement différentes et telles que le point P_{n-3} tombe sur la droite OT et

(+) Dans le cas d'un lavage équilibré relativement au solvant ($\varepsilon = 0$), le point Δ se trouverait sur le côté OB du triangle OAB.

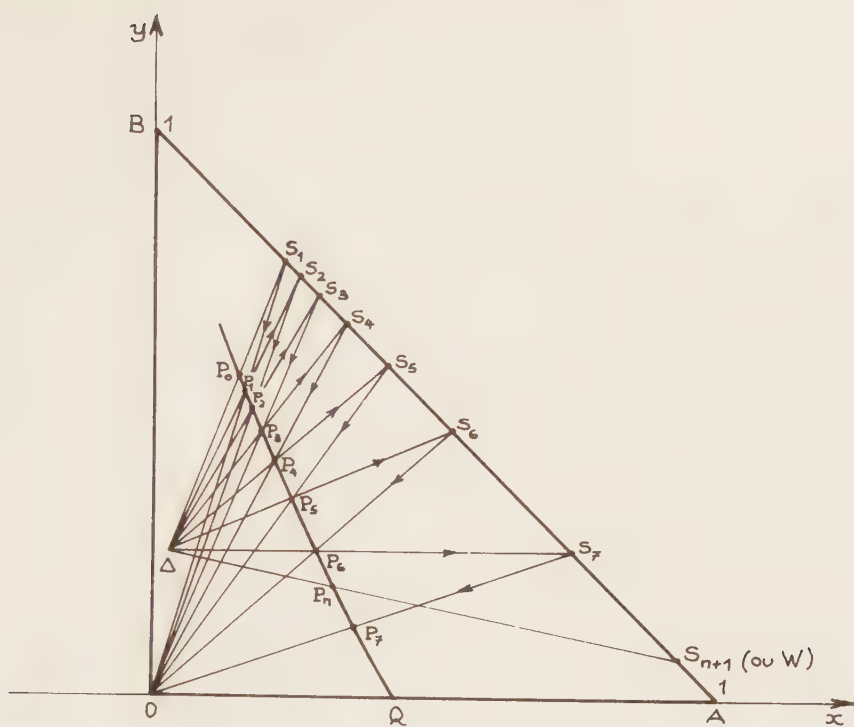


Fig. 15

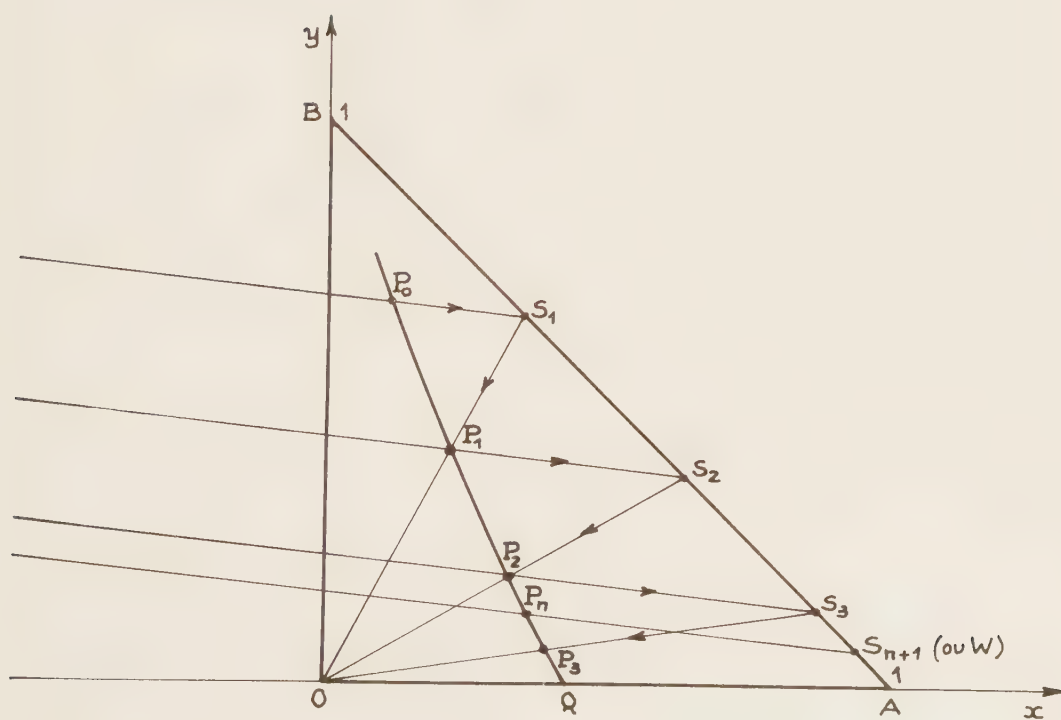


Fig. 16

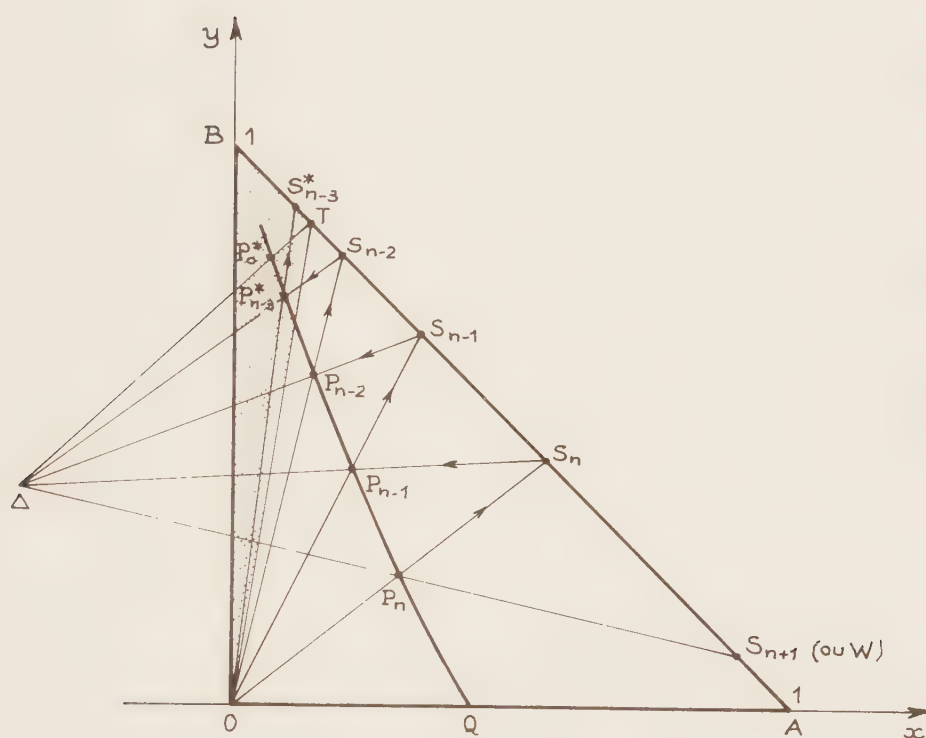


Fig. 17

que par suite le point S_{n-3} soit confondu avec le point T , la totalité du soluté contenu dans la pulpe P_{n-3} sortant du premier laveur aurait été à l'état dissous.

2) Méthode fondée sur l'utilisation des Quantités de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence

Nous pouvons également caractériser la pulpe P par les quantités (a_P) de solvant et (b_P) de soluté associées à une même quantité (i) d'insoluble, prise comme référence et considérée désormais comme un invariant (cette masse (i) d'insoluble pourra en particulier être l'unité de masse, auquel cas la quantité (a_P) de solvant représentera la dilution de la pulpe définie relativement au solvant). Ce mode de caractérisation, où interviennent ce qu'en abrégé nous appellerons les "quantités de solvant et de soluté associées" ou même simplement les "quantités associées" (sous-entendu : à la masse (i) d'insoluble de référence) fait jouer un rôle analogue aux deux variables (a_P) et (b_P) , mais un rôle différent à la variable (i), qui ne figure plus en tant que variable explicite. Le système ternaire constitué par la pulpe ne comporte plus dès lors que les deux variables indépendantes (a_P) et (b_P) . Le mode de caractérisation en question est particulièrement bien adapté aux problèmes de lavage des pulpes du fait précisément de l'invariance de la quantité d'insoluble tout au long du lavage.

Pour la représentation graphique, nous nous donnerons deux axes rectangulaires concourant au point O : $x'Ox$ (axe du solvant), $y'Oy$ (axe du soluté), sur lesquels nous choisirons arbitrairement deux vecteurs unitaires $\vec{u}_x$ et $\vec{u}_y$ (fig. 18). Le point représentatif (ou figuratif) de la pulpe P sera le point P , extrémité du vecteur $\vec{OP}$ tel que :

$$\vec{OP} = a_P \cdot \vec{u}_x + b_P \cdot \vec{u}_y \quad (134)$$

Sur un tel diagramme, l'insoluble pur est représenté par l'origine des coordonnées ($a_P = b_P = 0$). Une solution clarifiée, considérée comme cas limite d'une pulpe infiniment dispersée dans laquelle la masse (i) d'insoluble serait associée à une quantité infinie de solution, est évidemment représentée par un point rejeté à l'infini (comme d'ailleurs le solvant pur et le soluté pur dont elle est constituée). La représentation peut de ce fait couvrir toute la surface de l'angle xOy . En conséquence, on dira qu'on a affaire à une représentation ouverte.

Les droites issues de l'origine des coordonnées représentent des pulpes pour lesquelles le rapport Soluté/Solvant est constant. Les parallèles à l'axe Oy représentent de même des pulpes pour lesquelles le rapport Solvant/Insoluble est constant ou, en d'autre termes, des pulpes renfermant, par unité de masse d'insoluble, la même quantité de solvant (pulpes dites à équi-épaississement par rapport au solvant).

Si la droite OT représente les pulpes formées des mélanges d'insoluble et de solution saturée (fig. 19), l'angle xOT représentera les pulpes constituées par des mélanges d'insoluble et de solutions non saturées (c'est-à-dire les pulpes dans lesquelles la totalité du soluté est à l'état de solution), et l'angle yOT , les pulpes formées par des mélanges d'insoluble, de soluté indissous et de solution saturée (c'est-à-dire les pulpes dans lesquelles une partie du soluté est à l'état solide).

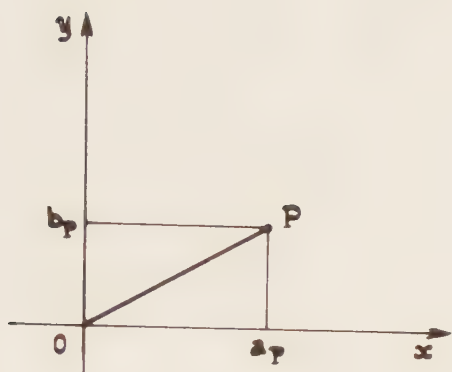


Fig. 18

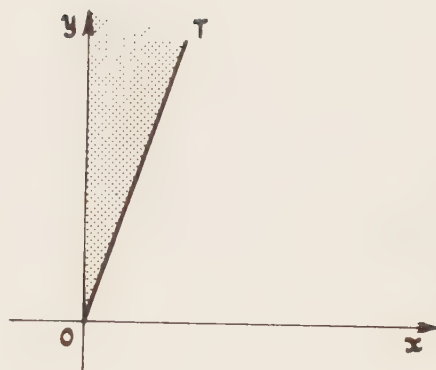


Fig. 19

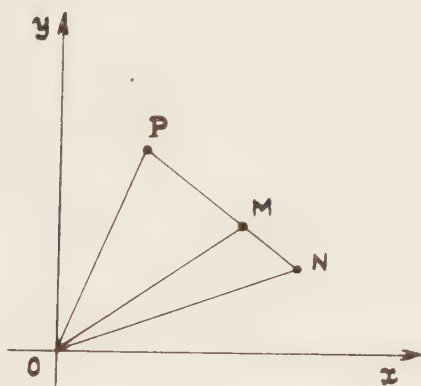


Fig. 20

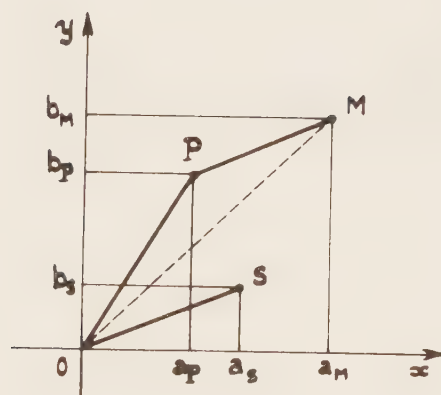


Fig. 21

Le fait que dans un système de ce genre on ne puisse pas représenter les solutions, constitue apparemment un désavantage, car c'est constamment que dans les opérations de lavage nous aurons à considérer à la fois des pulpes et des solutions. Nous allons voir comment on peut tourner la difficulté. Il convient pour cela de remarquer que si les quantités associées représentent les masses de solvant et de soluté rapportées à la masse (i) d'insoluble, les graduations des deux axes de coordonnées correspondent à des masses pures et simples de solvant et de soluté. En conséquence, à une quantité quelconque d'une solution S de constitution donnée (définie indépendamment de toute référence à une masse d'insoluble) on pourra faire correspondre un point du diagramme, et toutes les quantités possibles de cette solution seront représentées par les points d'une certaine droite passant par l'origine. Lorsqu'une quantité déterminée d'une telle solution sera associée, dans une opération quelconque de lavage, à une masse (i) d'insoluble, on pourra donc lui faire correspondre sur cette droite un point S (dit point représentatif) de coordonnées a_S (quantité de solvant) et b_S (quantité de soluté), ou, ce qui revient au même, un vecteur $\overrightarrow{OS}$ tel que :

$$\overrightarrow{OS} = a_S \cdot \overrightarrow{u_x} + b_S \cdot \overrightarrow{u_y} \quad (135)$$

Mais il faut bien noter que tandis qu'un point P du diagramme caractérise une certaine pulpe P du seul point de vue de sa constitution et sans référence à une quantité déterminée de pulpe, un point S tel qu'il a été défini représente, par contre, une solution S caractérisée à la fois en qualité et quantité et correspondant à une masse (i) d'insoluble (+).

Nous allons examiner maintenant la question du mélange de deux pulpes et du mélange d'une pulpe et d'une solution (le mot pulpe étant pris ici dans son sens strict et désignant un mélange de solvant, de soluté et d'insoluble).

Supposons d'abord qu'à une certaine quantité d'une pulpe P, correspondant à une masse i_P d'insoluble, on ajoute une autre quantité d'une pulpe N, correspondant à une masse i_N d'insoluble. La pulpe résultante (ou pulpe de mélange) M a comme quantités de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence :

$$a_M = \frac{\frac{a_P \cdot i_P}{i} + \frac{a_N \cdot i_N}{i}}{i_P + i_N} \cdot i = \frac{i_P \cdot a_P + i_N \cdot a_N}{i_P + i_N} \quad (136)$$

et :

$$b_M = \frac{\frac{b_P \cdot i_P}{i} + \frac{b_N \cdot i_N}{i}}{i_P + i_N} \cdot i = \frac{i_P \cdot b_P + i_N \cdot b_N}{i_P + i_N} \quad (137)$$

et on déduit de l'analogie formelle entre les expressions de a_M et b_M et celles de x_M et y_M obtenues précédemment, la relation :

$$(i_P + i_N) \cdot \overrightarrow{OM} = i_P \cdot \overrightarrow{OP} + i_N \cdot \overrightarrow{ON} \quad (138)$$

ou, sous une autre forme :

$$i_P \cdot \overrightarrow{MP} + i_N \cdot \overrightarrow{MN} = 0 \quad (139)$$

(+) Ceci provient du fait qu'une solution étant un système binaire, il suffirait en réalité d'un seul axe pour représenter les constitutions de toutes les solutions considérées (la constitution d'une solution particulière étant figurée par un point de cet axe).

On voit que la règle de mélange de deux pulpes est analogue à celle obtenue avec les compositions, c'est-à-dire que le point figuratif M de la pulpe résultante se trouvera sur la droite joignant les points figuratifs P et N des pulpes composantes (fig. 20). Le point M sera en particulier situé au milieu du segment PN si les deux pulpes composantes contiennent des masses égales d'insoluble.

Dans le cas de l'addition d'une solution, la règle des mélanges telle qu'elle est régie par les équations (138) et (139) ne s'applique plus, et il faut opérer autrement.

Supposons d'abord qu'à la quantité de pulpe P correspondant à la masse (i) d'insoluble de référence et renfermant par suite les quantités a_P de solvant et b_P de soluté, nous ajoutons la quantité de solution S représentée par le point S et renfermant les quantités a_S de solvant et b_S de soluté. La pulpe résultante M contiendra évidemment la masse (i) d'insoluble, à laquelle seront associées les quantités respectives de solvant et de soluté :

$$a_M = a_P + a_S, \quad b_M = b_P + b_S \quad (140)$$

de sorte que le point figuratif M de cette pulpe résultante sera déterminé par l'équation vectorielle :

$$\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{OS} \quad (141)$$

ou, en remarquant que $\overrightarrow{OP} - \overrightarrow{OM} = \overrightarrow{MP}$:

$$\overrightarrow{MP} + \overrightarrow{OS} = \mathbf{0} \quad (142)$$

Si donc on ajoute à une quantité de pulpe de point figuratif P , correspondant à la masse (i) d'insoluble de référence, une solution représentée en qualité et quantité par le point S , le point figuratif M de la pulpe de mélange résultante s'obtiendra en faisant la somme géométrique des vecteurs $\overrightarrow{OP}$ et $\overrightarrow{OS}$, c'est-à-dire en menant par le point P un vecteur $\overrightarrow{PM}$ équipollent au vecteur $\overrightarrow{OS}$ (fig. 21).

Dans le cas des systèmes ouverts, la règle de mélange d'une pulpe et d'une solution se traduit donc géométriquement d'une manière tout à fait différente de celle du mélange de deux pulpes (contrairement à ce qui a lieu dans le cas des systèmes fermés faisant intervenir les compositions, où la règle des mélanges reste la même, que l'on ajoute à une pulpe une autre pulpe ou une solution).

Toutes ces considérations s'appliquent naturellement à la soustraction, les masses correspondantes étant prises négativement.

°
° °

Nous allons voir maintenant comment on peut passer graphiquement des compositions aux quantités de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble, et inversement.

Etant donnée une pulpe P représentée en compositions par le point P (de coordonnées x_P et y_P) du diagramme triangulaire OAB (fig. 22), nous pouvons en déduire graphiquement les quantités a_P et b_P associées à la masse (i) d'insoluble, en opérant de la manière suivante. Considérons deux nouveaux axes AX et BY de directions quelconques (pouvant, en particulier, être pris perpendiculaires à l'hypoténuse AB du triangle) sur lesquels nous choisissons des vecteurs unitaires

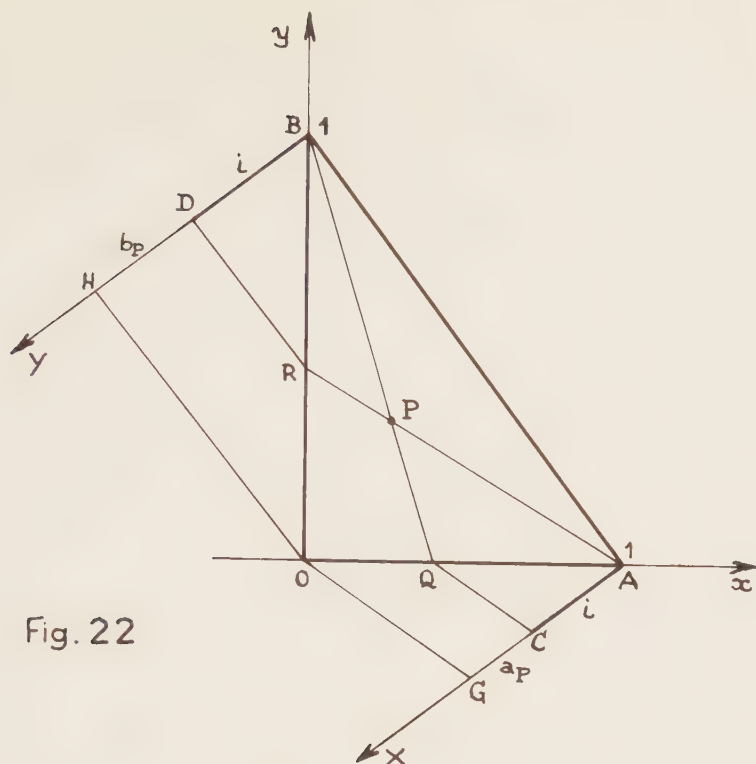


Fig. 22

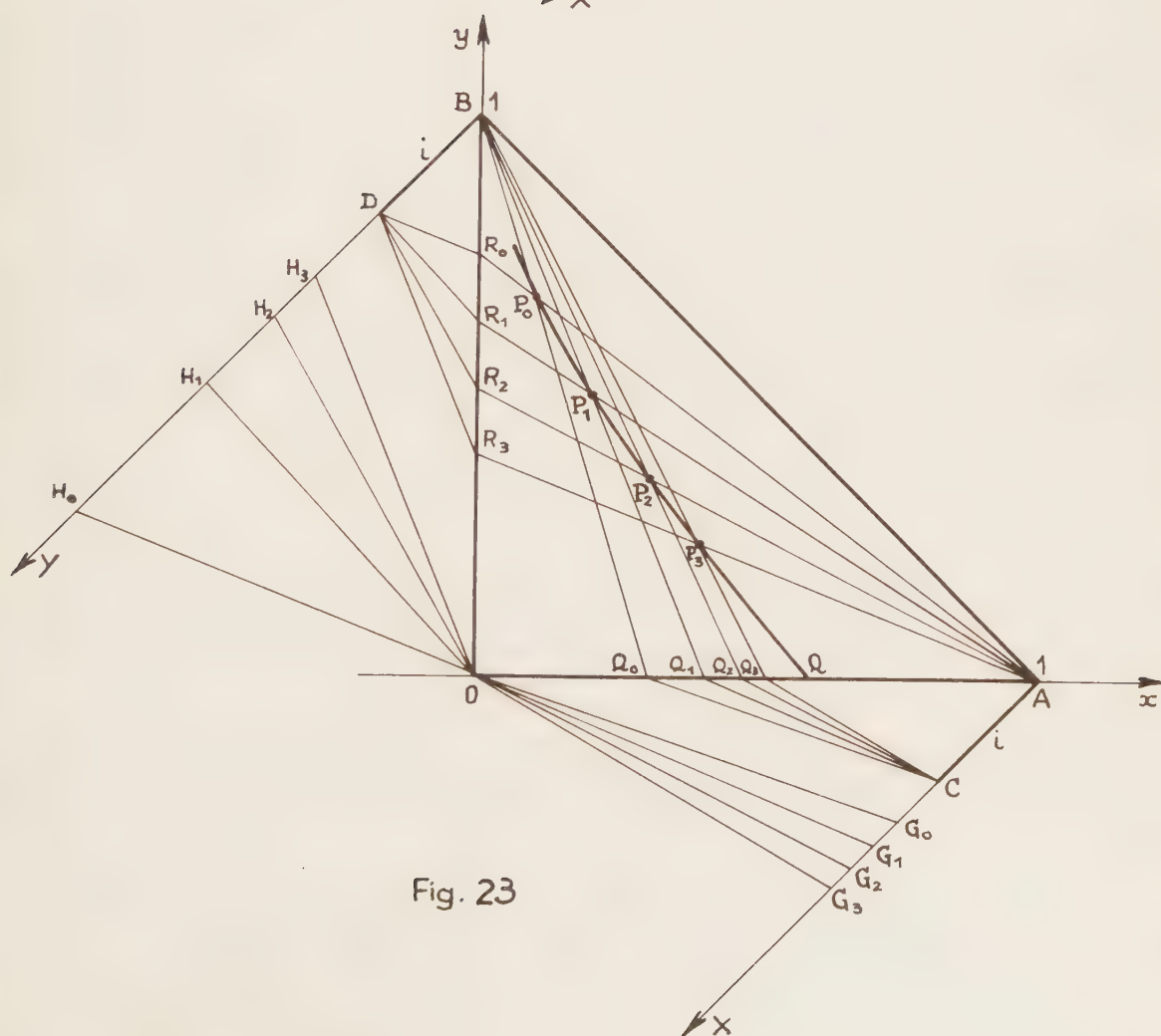


Fig. 23

arbitraires pour représenter l'unité de masse, la quantité (i) d'insoluble étant représentée par les segments AC et BD. Prolongeons la droite BP jusqu'à sa rencontre en Q avec le côté OA et joignons les points Q et C ; puis par le point O menons la parallèle OG à la droite QC. Le segment CG de l'axe AX représente la quantité a_P de solvant cherchée. De même, prolongeons la droite AP jusqu'à sa rencontre en R avec le côté OB et joignons les points R et D ; puis par le point O menons la parallèle OH à la droite RD. Le segment DH de l'axe BY représente la quantité b_P de soluté cherchée.

Inversement, connaissant les quantités a_P de solvant et b_P de soluté associées dans une pulpe P à la masse (i) d'insoluble et représentées par les segments CG et DH des axes AX et BY, nous pouvons en déduire le point représentatif P de la pulpe sur le diagramme triangulaire et par suite les compositions x_P, y_P, z_P de cette pulpe. Pour cela, joignons les points O et G, et par le point C menons la parallèle à la droite GO jusqu'à sa rencontre en Q avec le côté OA ; puis traçons la droite BQ. Joignons de même les points O et H, et par le point D menons la parallèle à la droite HO jusqu'à sa rencontre en R avec le côté OB ; puis traçons la droite RA. Le point P cherché se trouve à l'intersection des droites QB et RA.

Cette méthode graphique est particulièrement intéressante dans le cas d'une opération de lavage. Si l'on suppose reportés sur le diagramme triangulaire (fig. 23) les points figuratifs $P_0, P_1, P_2, \dots$ des pulpes épaissies successives obtenues au cours du lavage, on en déduit aisément les quantités $a_0, a_1, a_2, \dots$ de solvant (représentées par les segments $CG_0, CG_1, CG_2, \dots$ de l'axe AX) et $b_0, b_1, b_2, \dots$ de soluté (représentées par les segments $DH_0, DH_1, DH_2, \dots$ de l'axe BY), associées dans ces pulpes à la masse (i) d'insoluble.

Inversement, si l'on connaît les quantités $a_0, a_1, a_2, \dots$ de solvant (dilutions) associées à la masse (i) d'insoluble dans les pulpes épaissies successives obtenues au cours du lavage de la pulpe initiale P_0 (loi des épaississements), et représentées par les segments $CG_0, CG_1, CG_2, \dots$ de l'axe AX, on peut en déduire les droites d'équi-épaississement $BQ_0, BQ_1, BQ_2, \dots$ du diagramme triangulaire, lieux respectifs des points figuratifs des pulpes $P_0, P_1, P_2, \dots$



Dans le cas du lavage, sur le diagramme défini précédemment (fig. 24) et avec les conventions établies, la pulpe épaissie quittant le laveur de rang $(p-1)$ et entrant dans le laveur de rang p , est représentée par le point P_{p-1} tel que :

$$\overrightarrow{OP_{p-1}} = a_{p-1} \cdot \vec{u}_x + b_{p-1} \cdot \vec{u}_y \quad (143)$$

tandis que la solution clarifiée correspondante sortant à l'effluent du laveur de rang p est de son côté représentée par le point S_p tel que :

$$\overrightarrow{OS_p} = E_p \cdot \vec{u}_x + B_p \cdot \vec{u}_y \quad (144)$$

Cherchons la direction du vecteur $\overrightarrow{P_{p-1}S_p}$. Nous avons :

$$\overrightarrow{P_{p-1}S_p} = \overrightarrow{OS_p} - \overrightarrow{OP_{p-1}} = (E_p - a_{p-1})\vec{u}_x + (B_p - b_{p-1})\vec{u}_y \quad (145)$$

ou, en remarquant que $E_p - a_{p-1} = \varepsilon$ et $B_p - b_{p-1} = -F$ (ε désignant le déséquilibre du lavage par rapport au solvant et F le flux net de soluté) :

$$\overrightarrow{P_{p-1} S_p} = \varepsilon \cdot \overrightarrow{u_x} - F \cdot \overrightarrow{u_y} \quad (146)$$

Cette dernière équation montre que les vecteurs $\overrightarrow{P_0 S_1}$, $\overrightarrow{P_1 S_2}$, ..., $\overrightarrow{P_n S_{n+1}}$ sont équipollents au vecteur :

$$\overrightarrow{OV} = \varepsilon \cdot \overrightarrow{u_x} - F \cdot \overrightarrow{u_y} \quad (147)$$

°
° °

Le principe de la méthode graphique fondée sur l'utilisation des quantités de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référence et appliquée à la résolution des problèmes de lavage est le suivant :

On suppose connues (en se les donnant a priori ou en les déduisant de résultats expérimentaux) les quantités de solvant (dilutions) : $a_0, a_1, a_2, \dots$ associées à la masse (i) d'insoluble dans les pulpes épaissies successives obtenues au cours du lavage (loi d'épaississement). On se propose de déterminer le nombre d'étages nécessaire pour que la quantité b_n de soluté associée dans la pulpe résiduelle à la masse (i) d'insoluble soit égale à une valeur fixée. On connaît donc la constitution de la pulpe initiale $P_0(a_0, b_0)$, celle de la pulpe finale désirée $P_n(a_n, b_n)$, et celle du liquide de lavage $S_{n+1}(L, B_L)$. On en déduit le déséquilibre $\varepsilon = L - a_n$ du lavage, le flux de soluté $F = b_n - B_L$, et par suite le vecteur $\overrightarrow{OV} = \varepsilon \cdot \overrightarrow{u_x} - F \cdot \overrightarrow{u_y}$. On procède alors comme suit (fig. 24). Du point P_0 on mène le vecteur $\overrightarrow{P_0 S_1}$ équipollent à $\overrightarrow{OV}$, ce qui détermine le point S_1 (on peut dire également que le point S_1 se trouve à l'intersection de la parallèle menée du point P_0 au vecteur $\overrightarrow{OV}$, avec la parallèle à l'axe des ordonnées menée par le point $E_1 = a_0 + \varepsilon$ de l'axe des abscisses). Le point P_1 se trouve à l'intersection de la droite OS_1 (ou de son prolongement) avec la parallèle à l'axe des ordonnées menée par le point a_1 de l'axe des abscisses (la pulpe P_1 et la solution S_1 ont en effet le même rapport Soluté/Solvant, et par suite les points S_1 et P_1 sont alignés avec l'origine). Du point P_1 on mène le vecteur $\overrightarrow{P_1 S_2}$ équipollent à $\overrightarrow{OV}$, et ainsi de suite. On continue jusqu'à l'obtention d'une pulpe dont la quantité associée de soluté est égale à b_n ou à défaut immédiatement inférieure. Ainsi, dans l'exemple représenté sur la figure 24, qui se rapporte à un lavage à dilutions croissantes (épaississements décroissants) déséquilibré par excès relativement au solvant, le point b_n de l'axe des ordonnées est encadré par les points b_2 et b_3 , et l'installation devra en conséquence comporter 3 étages de lavage. Dans ce cas, la pulpe finale P_3 sera un peu mieux épuisée et la solution récupérée S_1 un peu plus riche qu'il n'était prévu. On pourra alors diminuer progressivement la quantité de liquide de lavage (ce qui fera décroître le déséquilibre ε du lavage et croître le flux F de soluté), jusqu'à ce que l'on ait $b_3 = b_n$. Les nouvelles conditions du lavage permettront alors d'atteindre exactement la teneur fixée pour la pulpe finale. La construction graphique donnera en même temps, d'une manière très simple, les quantités de solvant et de soluté correspondant à la masse (i) d'insoluble, pour toutes les pulpes épaissies et solutions clarifiées intermédiaires.

Le cas de la figure 25 a trait à un lavage à dilutions croissantes (épaississements décroissants) déséquilibré par défaut relativement au solvant, pour lequel 5 étages seraient nécessaires.

Si le lavage est à équi-épaississement par rapport au solvant, les points $P_0, P_1, P_2, \dots$ d'une part, et $S_1, S_2, S_3, \dots$ d'autre part, sont situés respectivement sur deux droites parallèles à l'axe des ordonnées. Un exemple d'un lavage à équi-épaississement déséquilibré par excès relativement au solvant, devant comporter 3 étages, est représenté sur la figure 26.

La détermination graphique devient difficile quand ε tend vers zéro, mais est à nouveau aisée quand $\varepsilon = 0$ (lavage équilibré par rapport au solvant), puisqu'on a dans ce cas :

$$\overrightarrow{P_{p-1}S_p} = -F \cdot \vec{u}_y \quad (148)$$

le vecteur $\overrightarrow{OV}$ étant alors porté par l'axe des ordonnées.

Le cas de la figure 27 correspond à un lavage à dilutions croissantes (épaississements décroissants) équilibré par rapport au solvant, pour lequel 4 étages seraient nécessaires.

Si le lavage est à la fois à équi-épaississement et équilibré relativement au solvant, les points $P_0, P_1, P_2, \dots$ d'une part, et $S_1, S_2, S_3, \dots$ d'autre part, sont situés sur une même droite parallèle à l'axe des ordonnées menée par le point a_0 de l'axe des abscisses, les points P_p et S_p étant confondus. Un exemple d'un tel lavage, qui devrait comporter 3 étages, est représenté sur la figure 28.

3) Méthode fondée sur l'utilisation des Concentrations par l'intermédiaire des droites d'opération et de partage (Méthode de McCabe et Thiele généralisée)

Le terme "concentration" est pris ici dans un sens large et désigne la masse de soluté par unité de volume ou de masse de solution, ou par unité de masse de solvant. Les phases liquides des pulpes sont en conséquence caractérisées par les volumes ou les masses de solution ou par les masses de solvant, rapportées à la masse (i) d'insoluble de référence. On suppose que la totalité du soluté est à l'état de solution dans les pulpes considérées.

Si l'on mélange une pulpe P contenant une quantité a_P de phase liquide de concentration β_P et une pulpe N contenant une quantité a_N de phase liquide de concentration β_N , la concentration β_M de la phase liquide de la pulpe résultante sera déterminée par la relation :

$$\beta_M = \frac{a_P \beta_P + a_N \beta_N}{a_P + a_N} \quad (149)$$

Des observations analogues s'appliquent bien entendu aux solutions.

La considération des concentrations en soluté des pulpes et des solutions clarifiées aux différents étages d'un dispositif de lavage permet de suivre d'une manière précise les états transitoires successifs des pulpes au cours de l'opération.

°
° °

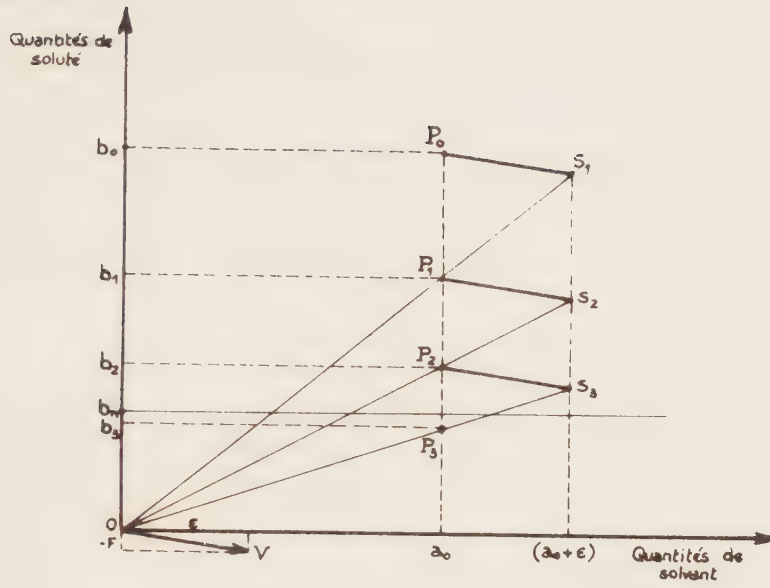


Fig. 26

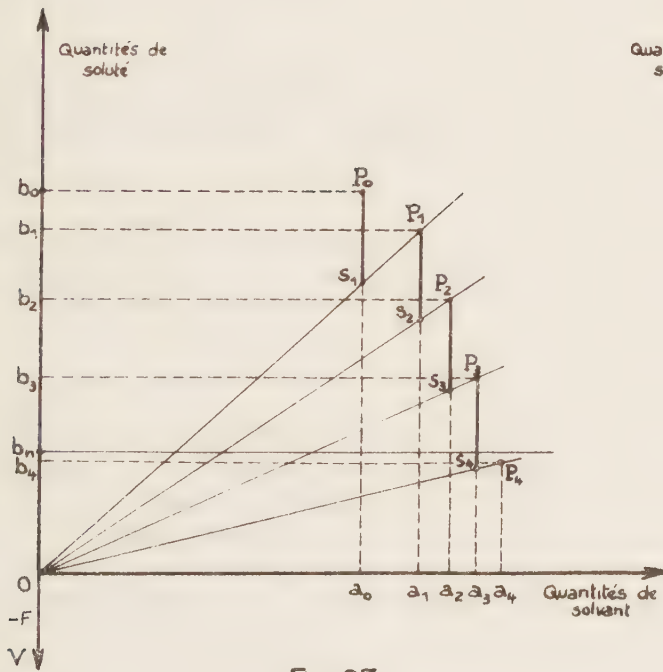


Fig. 27

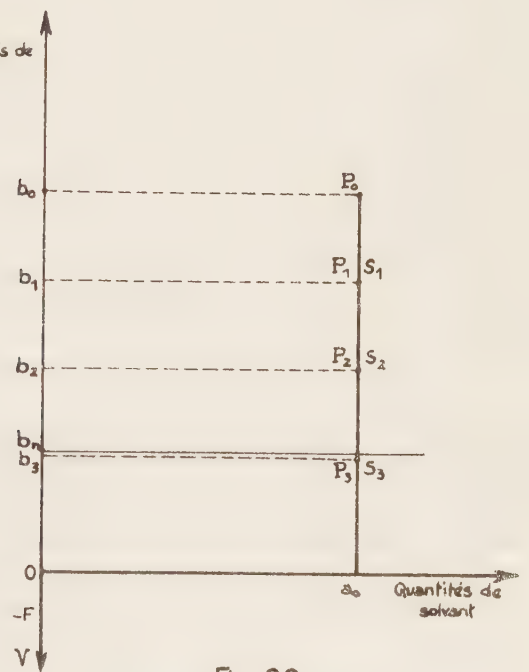


Fig. 28

Sur un système d'axes rectangulaires pourvus de vecteurs unitaires de même longueur, on porte en abscisses les concentrations (β_j^I) des solutions clarifiées (ou extraits) et en ordonnées les concentrations (β_j^{II}) des solutions d'imprégnation des pulpes épaissies (ou raffinats) aux divers étages du lavage.

Si le lavage est à équi-épaississement (+) (ce que nous supposons désormais), le bilan global de soluté pour les p premiers étages s'écrit (en observant que $a_j = a_0$ et $E_j = L$) :

$$a_0 \beta_0 + L \beta_{p+1}^I = a_0 \beta_p^{II} + L \beta_1^I \quad (150)$$

ou :

$$a_0 (\beta_p^{II} - \beta_0) = L (\beta_{p+1}^I - \beta_1^I)$$

d'où :

$$\frac{\beta_p^{II} - \beta_0}{\beta_{p+1}^I - \beta_1^I} = \frac{L}{a_0} = \lambda \quad (151)$$

L'équation (151) montre que sur le diagramme des concentrations considéré, les divers points de coordonnées ($\beta_{p+1}^I, \beta_p^{II}$) sont situés sur une droite, appelée droite d'opération, passant par le point (β_1^I, β_0) et dont la pente est égale au facteur de lavage $\lambda = L/a_0$.

Etant donné que $\varepsilon = (\lambda - 1) a_0$, la pente de la droite d'opération est donc supérieure à 1 si le lavage est déséquilibré par excès ($\varepsilon > 0$ ou $\lambda > 1$), inférieure à 1 si le lavage est déséquilibré par défaut ($\varepsilon < 0$ ou $\lambda < 1$). Elle est égale à 1 si le lavage est équilibré ($\varepsilon = 0$ ou $\lambda = 1$), la droite d'opération et la droite de partage (voir ci-après) étant alors parallèles.

Si par ailleurs, ainsi que nous le supposons expressément, on réalise à tous les étages du système une homogénéisation complète des pulpes et des solutions de lavage (les étages étant alors dits "théoriques") on a, pour tout étage de rang p :

$$\beta_p^I = \beta_p^{II} = \beta_p \quad (152)$$

c'est-à-dire que la courbe de partage (++) est, dans le cas présent, une droite de partage constituée par la bissectrice des axes de coordonnées.

°
° °

En ce qui concerne le fonctionnement d'un étage quelconque de rang p, quand on met la pulpe épaissie provenant du (p-1) ième étage en contact avec la solution de lavage provenant du (p+1) ième étage, on a, en désignant par β_p^{II} la valeur transitoire moyenne à un instant donné de la concentration de la solution d'imprégnation de la pulpe, et par β_p^I la valeur correspondante de la concentration de la solution clarifiée, l'équation de conservation du soluté (lavage à équi-épaississement) :

(+) L'équi-épaississement correspond, dans le cas de l'extraction liquide-liquide, à l'immiscibilité du diluant et du solvant.

(++) Nous employons l'expression "courbe de partage" de préférence à "courbe d'équilibre" pour ne pas créer de confusion avec ce que nous appelons l' "équilibre" ou le "déséquilibre" du lavage qui, eux, ont trait à la quantité de liquide de lavage utilisée.

$$a_0\beta_{p-1} + L\beta_{p+1} = a_0\beta_p'' + L\beta_p' \quad (153)$$

d'où :

$$\frac{\beta_p'' - \beta_{p-1}}{\beta_p' - \beta_{p+1}} = - \frac{L}{a_0} = -\lambda \quad (154)$$

On voit qu'à mesure que l'homogénéisation se poursuit et que le transfert de soluté s'effectue entre la pulpe et la solution de lavage entrantes, le point Q_p de coordonnées (β_p', β_p'') se déplace sur une droite de pente $-L/a_0 = -\lambda$ (+), depuis le point "initial" A_p de coordonnées $(\beta_{p+1}, \beta_{p-1})$ qui correspond à un mélange nul, jusqu'au point "final" B_p de coordonnées (β_p, β_p) qui correspond à l'homogénéisation complète (et à l'arrêt du transfert de soluté). Le point B_p se trouve évidemment à l'intersection de la droite considérée et de la droite de partage (fig. 29).

Le cas de la figure 29, pour lequel la partie utile A_pB_p de la droite précédente est située au-dessus de la droite de partage, avec $\beta_p' < \beta_p''$, correspond à un lavage par dilution, dont la condition idéale d'efficacité est l'homogénéisation complète. Ce cas est le plus fréquent, les concentrations de la solution d'imprégnation d'une pulpe épaissie et de la solution de lavage avec laquelle elle est mise en contact ayant en général spontanément tendance à se rapprocher et la pulpe de mélange correspondante à passer momentanément par une phase intermédiaire de dilution imparfaite pour aboutir, sous l'effet de l'agitation, à l'homogénéisation complète(++).

°
° °

Le principe de la méthode graphique fondée sur l'utilisation des concentrations et appliquée à la résolution des problèmes de lavage est le suivant :

On connaît la constitution (a_0, β_0) de la pulpe initiale, la concentration $\beta_L \equiv \beta_{n+1}$ du liquide de lavage, la concentration β_n désirée de la pulpe finale. On peut donc reporter sur le diagramme (fig. 30) le point B de coordonnées (β_L, β_n) représentant l'extrémité "pauvre" en soluté du dispositif de lavage (+++). Le point A de coordonnées (β_1, β_0) représentant l'extrémité "riche" du dispositif est situé sur le segment CD de la parallèle à l'axe des abscisses, d'ordonnée β_0 . La position du point A sur ce segment de droite détermine la quantité L de liquide de lavage utilisée (laquelle est maximale en C et minimale en D). Le point A étant fixé, on peut tracer la droite d'opération AB. Le nombre d'étages s'obtient à l'aide d'un tracé de gradins $AA_1A_2A_3\dots$ entre la droite d'opération et la droite de partage. On passe du point A au point A_1 en tenant compte de la relation (152), puis du point A_1 au point A_2 en tenant compte de la relation (151), puis au point A_3 en appliquant à nouveau la relation (152), et ainsi de suite. On continue jusqu'à

(+) La pente de la droite considérée est égale à -1 lorsque le lavage est à équi-épaississement équilibré ($L = a_0$).

(++) Il peut cependant exister un processus différent, qui fait passer le système du point "initial" $A_p(\beta_{p+1}, \beta_{p-1})$ à un point "final" $R_p(\beta_p', \beta_p'')$, avec $\beta_p' > \beta_p''$, situé de l'autre côté de la droite de partage et qui correspond à un lavage par déplacement. On conçoit qu'un tel lavage ne puisse s'effectuer que dans des circonstances un peu exceptionnelles, pour des structures de pulpes et des conditions opératoires bien particulières.

(+++) Si le liquide de lavage était constitué par du solvant pur, le point B serait évidemment situé sur l'axe des ordonnées.

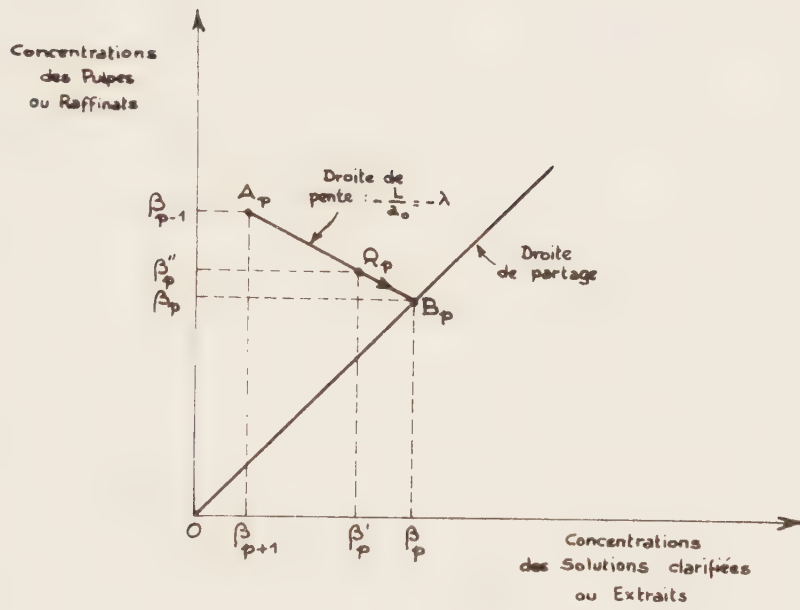


Fig. 29

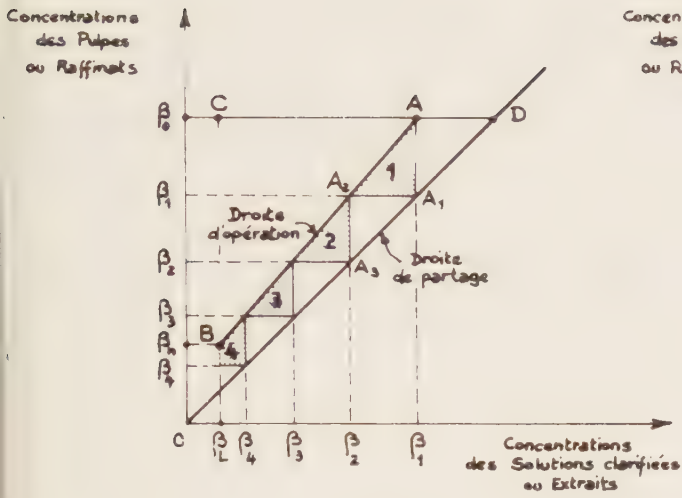


Fig. 30

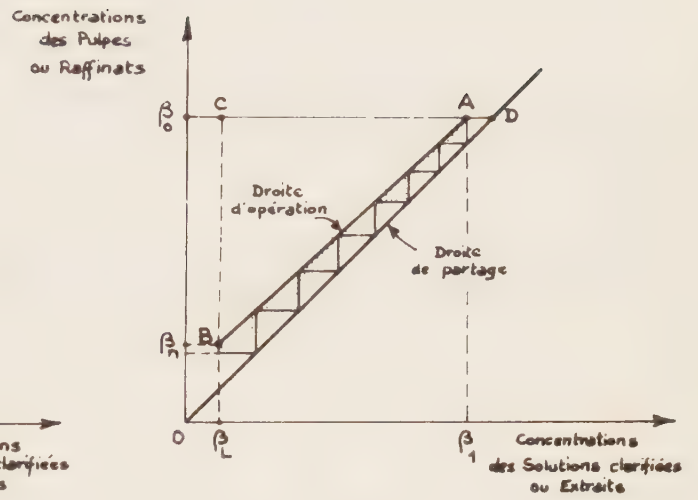


Fig. 31

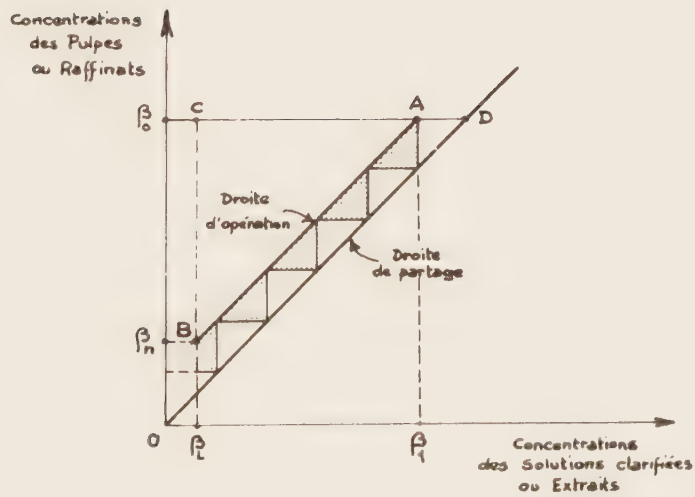


Fig. 32

l'obtention d'une concentration de pulpe égale ou à défaut immédiatement inférieure à la concentration β_n désirée, ce qui détermine le nombre d'étages nécessaire. Ainsi, dans l'exemple représenté sur la figure 30, la concentration β_n est encadrée par β_3 et β_4 , et l'installation devra par conséquent comporter 4 étages de lavage. Dans ce cas, la pulpe finale sera un peu mieux épuisée et la solution récupérée un peu plus riche qu'il n'était prévu. On pourra alors diminuer progressivement la quantité de liquide de lavage (en déplaçant le point A vers le point D), jusqu'à ce que l'on ait $\beta_4 = \beta_n$. Les nouvelles conditions du lavage permettront alors d'atteindre exactement la concentration fixée pour la pulpe finale. La construction graphique donnera en même temps, d'une manière très simple, les concentrations des solutions d'imprégnation des pulpes et des solutions clarifiées à tous les étages du lavage.

Les figures 30, 31 et 32 se rapportent respectivement à un lavage à équi-épaissement déséquilibré par excès, déséquilibré par défaut et équilibré. Les installations correspondantes devraient comporter 4, 7 et 5 étages de lavage.

°
° °

III - LAVAGE PAR DEPLACEMENT

III - LAVAGE PAR DEPLACEMENT

Sommaire

Dans une première partie, d'ordre théorique, nous analysons le processus physique du lavage par déplacement, dans lequel la solution d'imprégnation de la pulpe à laver est chassée globalement par le liquide de lavage, qui se substitue directement à elle de manière plus ou moins complète. Le déplacement - qui ne saurait jamais être parfait - n'est possible qu'avec des pulpes granuleuses perméables, grossièrement assimilables à un faisceau capillaire imprégné de la solution à extraire, la séparation solide-liquide étant ordinairement effectuée par filtration ou égouttage.

En caractérisant, dans une installation de lavage par déplacement, le degré de déplacement obtenu à chaque étage par ce que nous appelons les "coefficients de déplacement", nous montrons que ce type de lavage - bien que physiquement différent du lavage par dilution tant dans son principe que dans sa réalisation pratique - peut se traiter mathématiquement d'une manière semblable.

Dans une deuxième partie, d'ordre expérimental, nous étudions au laboratoire, avec un étage unique, un cas de lavage par déplacement. L'expérimentation porte sur une pulpe constituée par un concentré de chlorure de potassium qu'il s'agit d'enrichir en le débarrassant, au moins en partie, de son eau-mère d'imprégnation $\text{H}_2\text{O}-\text{KCl}-\text{NaCl}$, le NaCl constituant l'impureté à éliminer. Pour éviter les phénomènes secondaires pouvant masquer le déplacement proprement dit (notamment dissolution d'une partie du concentré au cours de l'opération) nous utilisons comme liquide de lavage une solution saturée en KCl plus ou moins riche en NaCl .

L'appareil utilisé se compose essentiellement d'une "égoutteuse" de laboratoire en verre (d'un diamètre de 12 cm, dans laquelle est placée la pulpe à laver) avec éprouvettes de prélèvement permettant le fractionnement des solutions recueillies, d'un limiteur de dépression et d'un vacuomètre. Le vide est obtenu au moyen d'une trompe à eau.

Les paramètres variables étudiés sont : la quantité de solution de lavage ; la hauteur de sel dans l'égoutteuse (5, 10, 20 et 40 cm) ; la quantité de solution d'imprégnation de la pulpe initiale (nous opérons avec les deux états initiaux "à capillaires pleins" et "à capillaires partiellement vides") ; la concentration β_L en NaCl de la solution de lavage ($\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$, β_0 étant la concentration en NaCl de la solution d'imprégnation de la pulpe initiale) ; le vide de soutirage (10 et 30 cm Hg).

Parmi les paramètres expérimentés, il est apparu que les plus importants sont la hauteur de sel dans l'égoutteuse (paradoxalement le déplacement est d'autant moins bon que la hauteur de sel est plus grande, tandis que le rendement de lavage croît avec cette hauteur de sel) et le vide de soutirage (un vide élevé, c'est-à-dire un grand débit d'écoulement des solutions, se révélant toujours défavorable). L'in-

fluence de l'état initial de la pulpe et celle de la concentration β_L en NaCl de la solution de lavage sont beaucoup moins marquées. Quant à la quantité de solution de lavage, le rendement de lavage croît naturellement avec elle, bien que la qualité du déplacement proprement dit, pour un lavage déséquilibré par excès, en soit indépendante.

Les opérations de déplacement effectuées se caractérisent par l'excellence des rendements obtenus en lavage équilibré, incomparablement supérieurs à ceux que donneraient les lavages par dilution correspondants. Ceci met en évidence l'intérêt du lavage par déplacement, qui doit évidemment être préféré au lavage par dilution chaque fois que la nature de la pulpe à laver le permet.

Les résultats des essais de laboratoire ont pu être transposés à l'échelle industrielle, ce qui a conduit à une économie très appréciable d'eau de lavage et à une simplification du mode opératoire, par rapport aux conditions antérieures.

°
° °

A - CONSIDERATIONS THEORIQUES

Nous allons examiner ici un type nouveau de lavage des pulpes, fondé sur un principe totalement différent de celui des lavages par dilution envisagés jusqu'à présent et qui consiste en la substitution directe - plus ou moins complète - du liquide de lavage à la solution d'imprégnation de la pulpe traitée. Un tel lavage - que nous appellerons lavage par déplacement - demande donc, contrairement au lavage par dilution, le moins de mélange possible entre la pulpe à laver et le liquide de lavage au cours du processus même de la substitution.

C'est en considérant le cas de liquides contenus dans des tubes que l'on conçoit le plus aisément l'opération de déplacement. Supposons donc que l'on veuille récupérer le liquide (solution d'imprégnation) remplissant un tube relativement étroit mouillé par ce liquide, en le chassant en bloc par un autre liquide qui lui est miscible (liquide de lavage) introduit à l'une des extrémités du tube et agissant à la manière d'un piston. Une analyse sommaire du phénomène montre que l'interpénétration des deux liquides sera d'autant plus faible que le front de contact entre ces liquides sera plus réduit, donc que le tube sera plus fin. Mais on ne peut pas, en contrepartie - indépendamment de la résistance que le liquide opposerait alors à son expulsion - diminuer par trop le diamètre du tube sans augmenter exagérément pour celui-ci le rapport de la surface latérale au volume, et par suite la proportion de liquide adhérant aux parois du tube que du fait des forces de viscosité la solution à récupérer laisse derrière elle en se retirant. En conséquence, le déplacement maximal du premier liquide par le second résultera d'un compromis entre ces deux exigences contradictoires, conduisant à un tube d'un diamètre optimal fonction de la nature des deux liquides en présence. L'existence même de ce compromis montre que le déplacement parfait ou récupération intégrale de la solution à extraire au moyen d'un volume juste égal de liquide d'extraction - qui constitue l'idéal vers lequel doit tendre l'opération considérée - n'est jamais réalisé en pratique.

De l'analyse qui précède il ressort que les pulpes grossièrement assimilables à un faisceau capillaire imprégné de la solution à extraire seront dans un état physique les rendant généralement aptes au lavage par déplacement. Une telle structure capillaire est précisément celle de la majorité des gâteaux de filtration - pour lesquels d'ailleurs le déplacement de la solution d'imprégnation peut être effectué assez commodément par simple arrosage avec les liqueurs de lavage - et qu'en conséquence nous considérerons comme les pulpes-types du lavage par déplacement. Le diamètre moyen des capillaires est fonction de la granulométrie et de l'homogénéité granulométrique de la pulpe considérée. Pour que le lavage par déplacement soit effectivement possible, il est indispensable que les capillaires, et par suite les solides constituant la pulpe, ne soient pas trop fins. Sinon, on a affaire à des gâteaux pratiquement imperméables, comme le sont la plupart des gâteaux argileux, pour lesquels il n'y a pas d'autre possibilité qu'un lavage par dilu-

tion moyennant repulpage intermédiaire. En fait, le lavage par déplacement sera donc l'apanage de pulpes suffisamment granuleuses, dont la filtration est relativement facile. Plus encore que dans le cas d'un capillaire unique, l'opération de déplacement - lorsqu'elle est possible - ne saurait jamais être parfaite. En effet, outre les raisons exposées à propos de ce dernier, s'ajoute, dans le cas d'une pulpe, la difficulté d'obtenir une répartition absolument uniforme du liquide de lavage sur toute la surface du gâteau et surtout d'empêcher qu'il ne se forme au sein de ce gâteau (par suite de fissures ou d'irrégularités de texture) des chemins préférentiels par lesquels le liquide de lavage se trouve canalisé (effet de drainage). Il en résulte que le déplacement parfait - dans lequel la totalité de la solution d'imprégnation de la pulpe serait exactement remplacée par un même volume de liquide de lavage, et qui conduirait ainsi à la récupération intégrale de cette solution d'imprégnation en quantité et qualité avec un seul étage de lavage équilibré - n'existe pas dans la réalité. On a en pratique, dans les lavages par déplacement, quelque chose d'intermédiaire entre le déplacement parfait et l'homogénéisation complète (+). Le déplacement est donc une opération techniquement difficile (parfois même impossible) à réaliser, contrairement à la dilution qui, ne demandant qu'un simple mélange, est d'une réalisation parfaite ordinairement aisée pour peu qu'on dispose d'un appareillage convenable. Il est vrai qu'en revanche la dilution parfaite est loin d'avoir sur l'efficacité du lavage la même influence favorable que le déplacement, ce dernier permettant d'obtenir des rendements de lavage particulièrement élevés lorsqu'il est effectué dans des conditions satisfaisantes.

Il convient de remarquer qu'un étage unique de lavage équilibré par rapport aux volumes de solutions (c'est-à-dire tel que le volume de liquide de lavage soit égal au volume de solution restant dans la pulpe résiduelle, ou encore tel que le volume de solution récupérée soit égal au volume de solution contenue dans la pulpe initiale) donnerait, dans le cas d'un déplacement parfait, le même résultat qu'un nombre infini d'étages dans le cas d'un lavage par dilution à contre-courant équilibré, que les lavages considérés soient à équi-épaississement ou à épaississements quelconques. On voit l'intérêt que présente, aussi bien pour le lavage par déplacement que pour le lavage par dilution à contre-courant, la notion de lavage équilibré, celui-ci étant le seul lavage qui, tout au moins théoriquement, puisse permettre la récupération intégrale de la solution d'imprégnation de la pulpe initiale à la fois en quantité et qualité.

Pour étudier l'influence du déplacement dans le cas général d'une installation de lavage à contre-courant à n étages (++), nous admettons qu'à chaque étage de rang p , une partie de la solution d'imprégnation de la pulpe provenant du $(p-1)$ ième étage est déplacée par la solution clarifiée (ou effluent) venant du $(p+1)$ ième étage et qu'en conséquence la solution clarifiée sortant de l'étage de rang p est à une

(+) Si la répartition de la solution de lavage sur la surface du gâteau était trop irrégulière ou les chemins préférentiels au sein du gâteau trop accentués, il pourrait même arriver que le lavage en question ait une efficacité inférieure à celle du lavage à homogénéisation complète correspondant et comparable à celle d'un lavage à dilution imparfaite. Nous supposons ici que le lavage est effectué dans des conditions excluant une telle éventualité.

(++) Nous supposons implicitement qu'il s'agit d'une installation de lavage par filtration.

concentration moyenne en soluté β_p^I supérieure à celle β_p^{II} de la solution d'imprégnation de la pulpe épaissie sortant de ce même étage (fig.33), soit :

$$\beta_p^I > \beta_p^{II}$$

L'équation générale de conservation du soluté, les équations donnant l'expression du flux net de soluté, du rendement effectif de lavage proprement dit, de la perte correspondante et de la concentration relative de la solution récupérée sont respectivement identiques aux équations (90), (91), (92), (93) et (94) écrites à propos de la dilution imparfaite.

On peut envisager d'utiliser, pour caractériser le déplacement, des coefficients expérimentaux donnés par les mêmes formules que celles par lesquelles nous avons défini les coefficients de dilution, le déplacement étant ainsi considéré comme une dilution imparfaite dont les coefficients pourraient varier de un à l'infini. Mais il paraît préférable de traiter le problème du déplacement indépendamment de celui de la dilution imparfaite et de définir, à partir des mêmes concentrations expérimentales, de nouveaux coefficients qui comme ceux de dilution restent compris entre zéro et un. Il est à remarquer que la valeur unité des coefficients représente alors l'idéal à atteindre, aussi bien dans le cas de la dilution que dans celui du déplacement.

Nous introduisons donc, pour chaque étage de rang p , un coefficient de déplacement τ_p défini par l'expression ci-après, à partir des concentrations moyennes β_p^I , β_p^{II} et β_{p+1}^I données par l'analyse (+) :

$$\tau_p = \frac{\beta_p^I - \beta_p^{II}}{\beta_p^I - \beta_{p+1}^I} \quad (155)$$

Ce coefficient est nul dans le cas de l'homogénéisation complète, c'est-à-dire quand il n'y a pas de déplacement ($\beta_p^I = \beta_p^{II} = \beta_p$), prend une valeur inférieure à l'unité lorsqu'il y a un certain déplacement ($\beta_p^I > \beta_p^{II}$) et tend vers l'unité ($\beta_p^{II} \rightarrow \beta_{p+1}^I$) quand la solution d'imprégnation de la pulpe tend à être complètement remplacée par la solution de lavage (à condition que $E_{p+1} \geq a_{p-1}$).

On déduit de l'expression (155) :

$$\beta_p^{II} = \beta_p^I - (\beta_p^I - \beta_{p+1}^I) \tau_p \quad (156)$$

de sorte que l'équation (90) de conservation du soluté peut être changée en la suivante, qui ne contient plus que des concentrations d'effluents :

$$a_{p-1} [\beta_{p-1}^I - (\beta_{p-1}^I - \beta_p^I) \tau_{p-1}] + E_{p+1} \beta_{p+1}^I = a_p [\beta_p^I - (\beta_p^I - \beta_{p+1}^I) \tau_p] + E_p \beta_p^I$$

puis ainsi regroupée :

$$(1 - \tau_{p-1}) a_{p-1} \beta_{p-1}^I + [E_{p+1} - \tau_p \cdot a_p] \beta_{p+1}^I = [(1 - \tau_p) a_p + E_p - \tau_{p-1} \cdot a_{p-1}] \beta_p^I \quad (157)$$

En posant alors, d'une façon générale :

$$\left. \begin{aligned} a_p^{II} &= (1 - \tau_p) a_p, & \text{avec } a_p^{II} < a_p \\ E_p^{II} &= E_p - \tau_{p-1} \cdot a_{p-1} \end{aligned} \right\} \quad (158)$$

(+) On a, dans le cas d'un étage unique, $\tau = \frac{\beta_1^I - \beta_1^{II}}{\beta_1^I - \beta_L}$, β_L désignant la concentration en soluté du liquide de lavage.

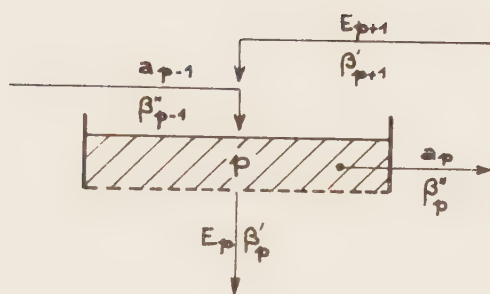


Fig. 33

d'où :

$$a_p = \frac{1}{1 - \tau_p} a_p'' , \quad E_p = E_p'' - \frac{\tau_{p-1}}{1 - \tau_{p-1}} a_{p-1}'' \quad (159)$$

on peut écrire finalement l'équation générale (90) sous la forme symbolique :

$$a_{p-1}'' \beta_{p-1}' + E_{p-1}'' \beta_{p-1}' = (a_p'' + E_p'') \beta_p' \quad (160)$$

En poursuivant les calculs comme nous l'avons fait pour le lavage à dilution imparfaite, nous verrions qu'il est possible de mettre toutes les autres équations du lavage par déplacement sous des formes symboliques accentuées (à accents prime et accents seconde) tout à fait analogues aux équations correspondantes du lavage par dilution à homogénéisation complète. On peut d'ailleurs déduire ces équations symboliques directement de celles écrites dans le cas du lavage à dilution imparfaite, en conservant les lettres à accent prime qui ont trait au soluté (et représentent des concentrations réelles d'effluents), et en remplaçant les lettres à accent prime qui se rapportent à la phase liquide (et représentent des dilutions et des effluents fictifs) par les lettres à accent seconde correspondantes.

Cette écriture symbolique a l'avantage de montrer que tout se passe, dans le cas du déplacement, comme si l'on avait réalisé un meilleur épaissement des pulpes, les épaissements fictifs c_p'' qui régissent alors le lavage étant liés aux épaissements réels c_p , par l'intermédiaire des coefficients de déplacement τ_p , suivant les relations :

$$c_p'' = \frac{1}{a_p''} = \frac{1}{1 - \tau_p} \cdot \frac{1}{a_p} = \frac{1}{1 - \tau_p} \cdot c_p \quad (161)$$

Les coefficients de déplacement aux différents étages caractérisent donc l'efficacité du dispositif de lavage au même titre que les épaissements des pulpes à ces mêmes étages. Comme les coefficients de dilution, ils jouent le rôle de pseudo-épaissements et peuvent eux aussi être finalement considérés comme un quatrième paramètre du lavage.

Connaissant les valeurs des divers coefficients de déplacement (facilement calculables à partir des concentrations en soluté données par l'analyse), il est donc possible de chiffrer exactement l'influence que le déplacement a sur le lavage, ses effets étant d'ailleurs d'autant moins marqués que le nombre d'étages est plus élevé.

En définitive, le lavage par déplacement - bien que physiquement différent du lavage par dilution tant dans son principe que dans sa réalisation pratique - peut, par l'introduction des coefficients de déplacement, se traiter mathématiquement d'une manière semblable.

Le déplacement est une opération très intéressante qui, lorsqu'elle est réalisable, entraîne, pour un nombre d'étages et une quantité de liquide de lavage donnés, une augmentation du rendement et de la concentration relative de la solution récupérée (c'est-à-dire procure un gain de soluté à la fois en quantité et qualité) ou permet, pour un rendement fixé, de diminuer le nombre des étages de lavage.

B - TRAVAIL EXPERIMENTAL

1) Exposé du problème

Nous nous proposons d'étudier au laboratoire, avec un étage unique, un cas de lavage par déplacement.

L'expérimentation porte sur une pulpe initiale constituée par un concentré de chlorure de potassium obtenu par le procédé thermique, qu'il s'agit d'enrichir au moyen d'un lavage par déplacement en le débarrassant, au moins en partie, de son eau-mère d'imprégnation. Celle-ci est constituée par une solution $H_2O-KCl-NaCl$, le $NaCl$ étant l'impureté à éliminer, présente en totalité à l'état dissous après que l'on ait fait disparaître le $NaCl$ solide par dissolution selon une technique appropriée. En effet, les taux de déplacement étant déterminés à partir de la mesure des concentrations en $NaCl$ des solutions obtenues, il est indispensable que tout le $NaCl$ soit et reste en solution durant l'opération. Sinon, la solution de lavage pourrait, au cours du déplacement, dissoudre ou précipiter du $NaCl$ solide au sein de la pulpe, ce qui modifierait les valeurs respectives des concentrations en $NaCl$ de la solution d'imprégnation résiduelle et de la solution récupérée, et conduirait par suite à des taux de déplacement différents de ceux réellement obtenus.

Afin de supprimer les phénomènes secondaires pouvant masquer le déplacement proprement dit (notamment cristallisation de $NaCl$ par évaporation de la solution d'imprégnation ou dissolution d'une partie du concentré par le liquide de lavage) nous avons été amené, d'une part à imprégner artificiellement le sel avec une eau-mère non totalement saturée en $NaCl$ et d'autre part à utiliser comme liquide de lavage (ou de déplacement) une solution saturée en KCl plus ou moins riche en $NaCl$. D'après les diagrammes de solubilités $H_2O-KCl-NaCl$ de Cornec et Krombach, il apparaît que le mélange à une température donnée d'une solution saturée dans les deux sels avec une solution saturée en KCl entraîne une légère précipitation de ce dernier. Tous calculs faits, dans le cas le plus défavorable de nos conditions opératoires (mélange à volumes égaux des deux solutions avec homogénéisation complète sans aucun déplacement), la quantité précipitée n'excède pas 0,6 % de la quantité de sel constituant la pulpe, ce qui est négligeable. Par contre, en ce qui concerne le $NaCl$ (constituant dont les concentrations servent à caractériser le phénomène de déplacement), le mélange des deux solutions ne provoque aucune précipitation.

Il aurait été évidemment plus simple de faire l'étude du déplacement à partir d'un solide granuleux insoluble dans l'eau, laquelle aurait pu en conséquence être utilisée comme liquide de déplacement de la solution d'imprégnation. En fait, de nombreux solides usuels sont doués de propriétés de surface importantes (adsorption, etc.) qui tendent à s'opposer au déplacement et peuvent par conséquent masquer ce dernier. Si nous avons finalement adopté le déplacement de l'eau-mère

d'imprégnation du chlorure de potassium, malgré les difficultés que comporte en pratique l'analyse précise du phénomène, c'est que le problème présente, outre son intérêt théorique, une réelle importance industrielle. Le KCl jouit d'ailleurs, au regard du déplacement des solutions salines, de propriétés physiques appropriées, aux différentes granulométries sous lesquelles il se présente. Précisons que si le problème initial était l'enrichissement du chlorure de potassium, nous avons en réalité fait une étude systématique du déplacement débordant largement le cadre du problème de départ.

2) Appareillage

Après avoir expérimenté différents appareillages, c'est celui représenté sur la figure 34 que nous avons finalement adopté pour nos essais de déplacement. Cet appareillage se compose essentiellement d'une "égoutteuse" de laboratoire avec éprouvettes de prélèvement, d'un limiteur de dépression, d'un flacon de garde et d'un vacuomètre. Le vide est obtenu au moyen d'une trompe à eau.

L'égoutteuse, qui fonctionne selon un principe voisin de celui d'une égoutteuse industrielle, est en verre. Elle comporte une partie cylindrique (dans laquelle on place la pulpe à laver et la solution de lavage) ayant un diamètre de 12 cm et une hauteur de 40 cm, munie à sa base d'un verre fritté de porosité n°4. Le filtrat est rassemblé dans la partie conique de l'égoutteuse comportant, en plus de la tubulure d'écoulement à la partie inférieure, une tubulure latérale reliée, par l'intermédiaire d'un robinet de communication à deux voies, d'une part au limiteur de dépression et d'autre part à l'atmosphère (ce qui permet la rupture instantanée du vide). Par l'intermédiaire d'un autre robinet à deux voies, il est possible de recueillir le filtrat par fractions séparées dans des éprouvettes graduées. Les dimensions de l'égoutteuse ont été choisies de manière à limiter les effets de parois tout en ne conduisant pas à des quantités prohibitives de sel (pour qu'on puisse comparer valablement entre eux les différents essais, ceux-ci ont en effet été effectués à partir d'un lot unique de sel homogène).

Le limiteur de dépression agit par aspiration de l'air à travers une hauteur déterminée de liquide (eau-mère), ce qui fixe automatiquement la grandeur du vide sous lequel on opère (celui-ci étant en outre contrôlé sur le vacuomètre à mercure). En réalité, la valeur du vide est également fixée par le débit de la trompe à eau, le limiteur de dépression jouant le rôle d'un véritable régulateur de vide.

Tous les essais ont été effectués dans une salle isotherme à la température uniforme de 25°C.

3) Paramètres étudiés

a) Paramètres fixes

Les paramètres fixes sont, outre la température (25°C), la nature du sel (granulométrie et composition chimique) et la composition de la solution d'imprégnation

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

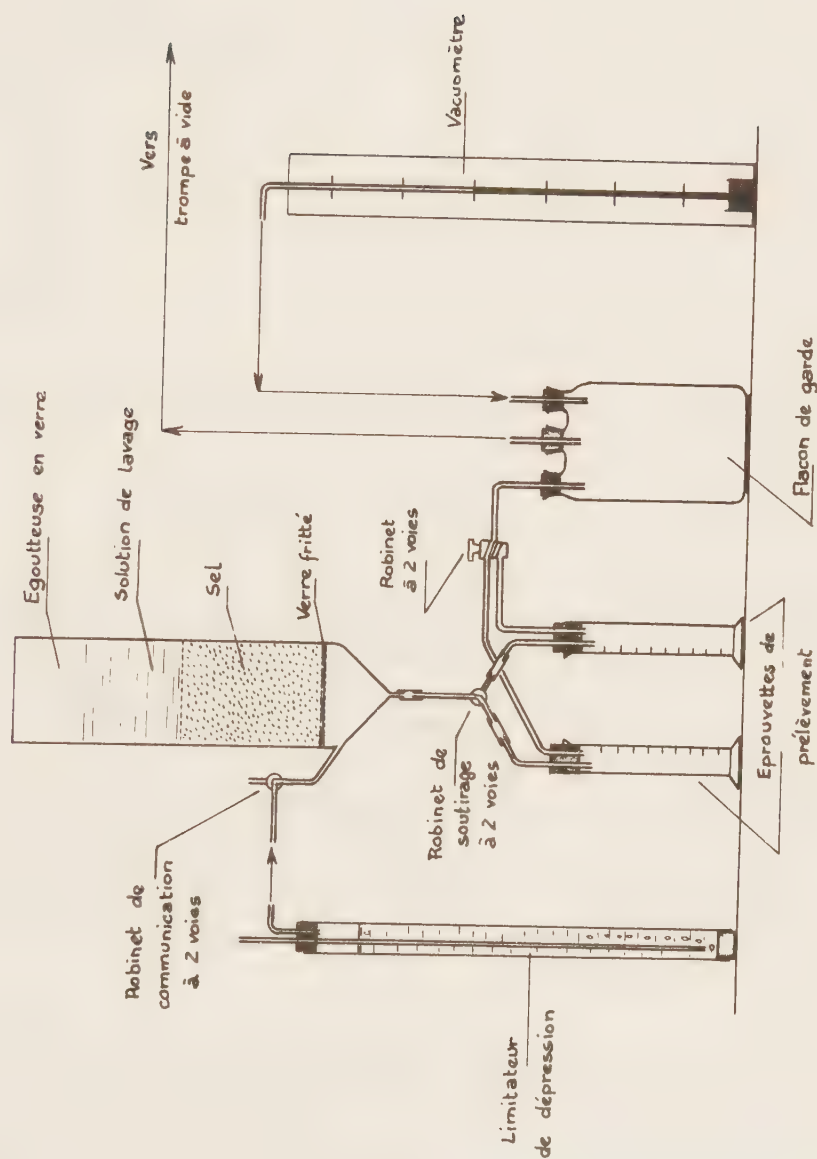


Fig. 34

de la pulpe initiale (+).

Après dissolution du NaCl solide, repulpage avec une eau-mère synthétique H₂O-KCl-NaCl (++) non totalement saturée en NaCl et centrifugation, le sel destiné aux essais était stocké dans des sacs étanches. Son humidité était de 2,63 % H₂O. Cette humidité provenait d'une solution d'imprégnation ayant la composition suivante :

H ₂ O	:	847,8 g/l		100 grammes
KCl	:	158,8 "	ou	18,73 "
NaCl	:	214,4 "		25,29 "

L'analyse granulométrique du sel, effectuée par tamisage humide en eau-mère saturée, a donné les résultats ci-après (calculés sur sel solide après déduction du sel provenant de l'eau-mère d'imprégnation) :

Mailles	mm	Masse %
-----	----	-----
> 20	0,83	0,52
> 28	0,59	5,05
> 35	0,42	23,83
> 48	0,29	37,63
> 65	0,21	22,98
> 100	0,15	8,19
< 100	0,15	1,80

La courbe granulométrique correspondante est représentée sur la figure 35.

b) Paramètres variables

Nous désignons par a_0 , L , E_1 , a_1 , les volumes respectifs de la solution d'imprégnation de la pulpe initiale, de la solution de lavage, de la solution récupérée (ou extrait) et de la solution d'imprégnation de la pulpe finale (ou pulpe résiduelle) ; et par β_0 , β_L , β_1' , β_1'' les concentrations en NaCl globales correspondantes, exprimées en grammes par litre. Les quantités a_0 et a_1 (ou plutôt leurs inverses) caractérisent les "épaississements" des pulpes initiale et finale.

Nous raisonnons, dans le cas présent, uniquement sur les volumes de solutions (le "déséquilibre" du lavage étant exprimé en conséquence). Dans un lavage par déplacement, les substitutions idéales des solutions de lavage aux solutions d'imprégnation des pulpes se font en effet volume à volume, et il est par ailleurs aisé d'opérer volumétriquement le fractionnement des solutions recueillies.

+) En réalité, le programme prévu ayant évolué au fur et à mesure du développement des essais, nous avons été amené à préparer de nouvelles solutions (tant d'imprégnation que de lavage) qui pouvaient présenter des concentrations en NaCl très légèrement différentes (différences maximales de l'ordre de 1,5 - 2 g/l). De toute façon, les caractéristiques correspondantes du lavage (rendements, coefficients de déplacement, etc.) ont été calculées à partir des concentrations réelles des solutions utilisées.

++) Cette eau-mère ne renferme donc pas de chlorures alcalino-terreux, comme c'est le cas pour une eau-mère potassique industrielle.

COURBE GRANULOMETRIQUE
DU SEL UTILISE
POUR L'ETUDE DU LAVAGE PAR DEPLACEMENT

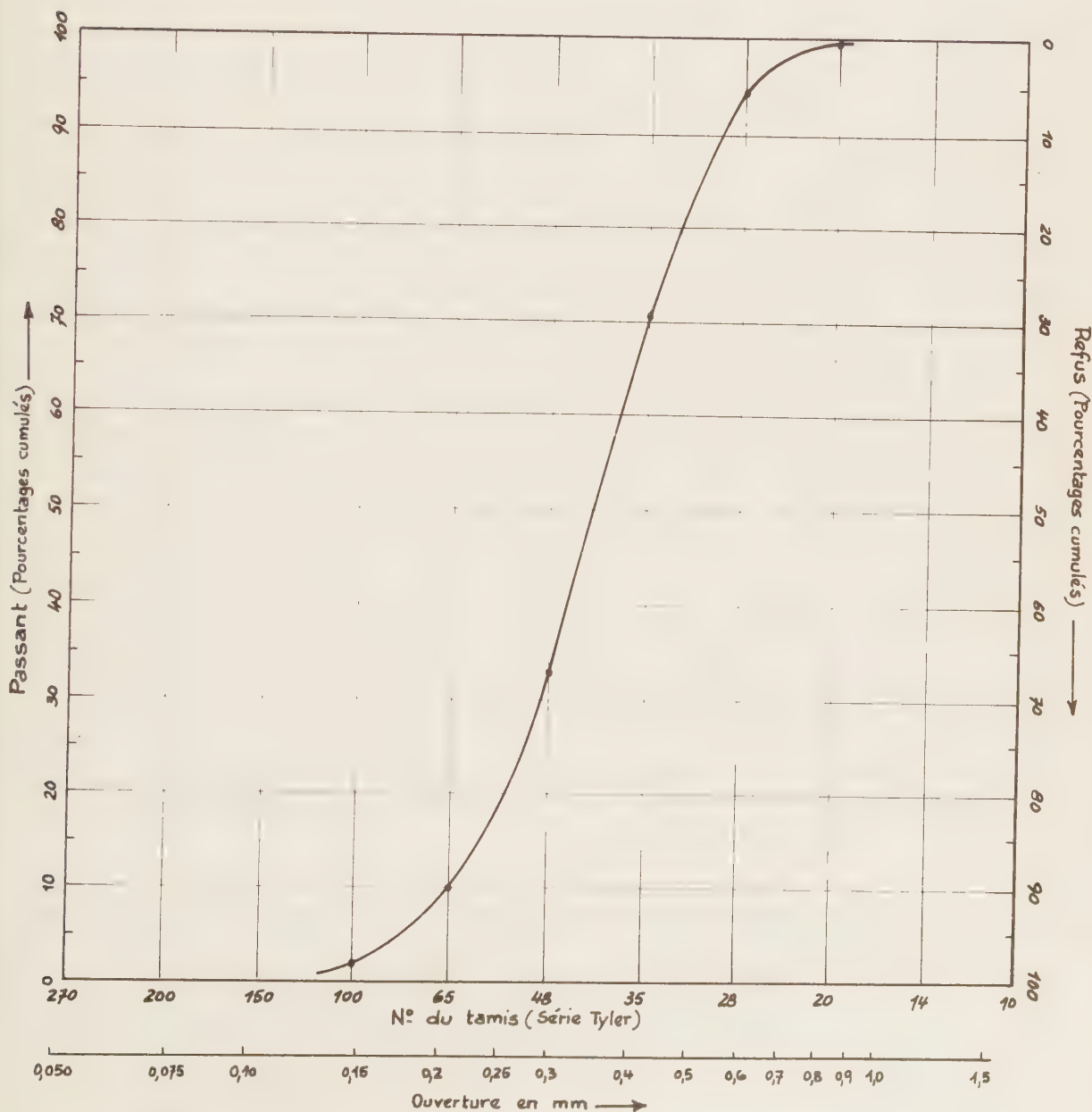


Fig. 35

Les paramètres variables étudiés sont les suivants :

- Hauteur de sel dans l'égoutteuse ;
- Quantité a_0 de solution d'imprégnation de la pulpe initiale ;
- Quantité L de solution de lavage ;
- Concentration β_L en NaCl de la solution de lavage ;
- Vide de soutirage.

Pour faciliter l'exposé, la description des essais concernant la hauteur de sel sera faite en dernier lieu.

Quantité a_0 de solution d'imprégnation de la pulpe initiale.

La mise en place dans l'égoutteuse d'un sel humide peut se faire aisément et d'une manière reproductible (tassement uniforme du sel) moyennant un repulpage approprié du sel stocké (qui possède une humidité constante et connue). On peut ainsi, par un soutirage ultérieur de la quantité de solution en excédent, ajuster exactement à la valeur désirée, la quantité de solution d'imprégnation de l'échantillon de sel avant l'essai de déplacement.

La solution utilisée pour le repulpage du sel dans l'égoutteuse a même composition que la solution d'imprégnation du sel stocké (voir plus haut).

Nous opérons avec deux quantités différentes de solution d'imprégnation initiale (pour une même masse de sel) :

- a) Une quantité de solution telle que l'échantillon de sel baigne complètement dans sa solution d'imprégnation, celle-ci affleurant juste la surface du sel. Nous dirons alors que l'état initial de la pulpe est "à capillaires pleins".
- b) Une quantité de solution correspondant à un égouttage sous vide sans évaporation sensible par aspiration d'air à travers la couche de sel (qui risquerait de provoquer une cristallisation du NaCl dissous). Cette quantité de solution représente grossièrement l'humidité globale que l'on obtiendrait par simple égouttage dans une égoutteuse de type industriel. Nous dirons alors que l'état initial de la pulpe est "à capillaires partiellement vides" ou que l'on opère "avec égouttage préalable".

L'expérience a montré que pour les hauteurs de sel de 5, 10 et 20 cm, les quantités de solution d'imprégnation "à capillaires pleins" étaient proportionnelles à ces hauteurs (ainsi qu'aux masses de sel dans l'égoutteuse), soit respectivement 250, 500 et 1000 cm³. Par contre, pour la hauteur de sel de 40 cm, cette quantité de solution n'était que de 1900 cm³.

En ce qui concerne les quantités de solution d'imprégnation "à capillaires partiellement vides", compte tenu à la fois des résultats d'expérience, de la commodité opératoire (fractionnement des solutions recueillies) et de la facilité de comparaison des différents essais entre eux, nous avons finalement adopté, pour les hauteurs de sel de 5, 10, 20 et 40 cm, les valeurs de 100, 200, 400 et 800 cm³, ce qui correspond à un rapport des quantités de solution à capillaires pleins et à capillaires partiellement vides de 2,5 (sauf pour la hauteur de sel de 40 cm, qui correspond à un rapport de 2,375).

Quantité L de solution de lavage.

La quantité de solution de lavage utilisée est variable suivant les essais, mais fixée en fonction des quantités de pulpe mises en oeuvre. De toute manière, elle n'est jamais inférieure à la quantité de solution d'imprégnation correspondant à l'état de la pulpe "à capillaires partiellement vides".

Il est d'ailleurs bon, pour avoir dans la solution récupérée la totalité de la zone de contact entre la solution d'imprégnation et la solution de lavage, d'opérer avec

une quantité de solution de lavage représentant un gros excès par rapport à celle qui serait normalement utilisée. Nous pouvons en effet toujours retrouver par le calcul, grâce au fractionnement de la solution récupérée, le taux d'extraction réalisé dans le cas d'un lavage équilibré ou d'un lavage de déséquilibre quelconque donné. L'expérience nous a de fait montré que toute quantité supplémentaire de solution de lavage ajoutée à une quantité initiale donnée de cette solution de lavage est sans influence significative sur la composition des fractions de solution récupérée recueillies antérieurement à celles qui correspondent à cette quantité supplémentaire. Les résultats étayant cette assertion ont été observés à propos de la hauteur de sel de 20 cm et figurent dans le tableau III ci-joint. Si on peut trouver parfois des différences de concentration en NaCl des fractions recueillies allant jusqu'à 5 g par litre, il faut bien remarquer que, rapportées à la fraction de 100 cm³ correspondante, ces différences ne sont plus en valeur absolue que de 0,5 g.

Quelle que soit la quantité de solution de lavage utilisée, celle-ci doit être répartie uniformément sur toute la surface du sel, ce qui est relativement aisé lorsqu'on opère à capillaires pleins mais devient plus difficile lorsqu'on opère à capillaires partiellement vides. Nous avons été amené à utiliser dans tous les cas une toile métallique fine posée sur la surface du sel, permettant une bonne répartition de la solution de lavage et empêchant la perturbation de la pulpe sous l'influence de la solution ajoutée.

Quant à la quantité de solution récupérée, elle dépendra à la fois des quantités de solution d'imprégnation initiale, de solution de lavage et de solution d'imprégnation finale (d'où il résulte que le lavage pourra être équilibré, à équi-épaississement ou quelconque). En règle générale (sauf pour certains essais particuliers à la hauteur de sel de 20 cm), le soutirage a été effectué de manière que l'état final des pulpes soit toujours "à capillaires partiellement vides". En effet, le chlorure de potassium enrichi étant normalement destiné à être séché, il est logique qu'on essaye de l'obtenir dans l'état de moindre humidité. Corrélativement, les caractéristiques de l'opération calculées pour un lavage "équilibré" l'ont été en se référant à l'état final à capillaires partiellement vides (le volume de solution de lavage pris en considération étant alors égal au volume de solution d'imprégnation finale à capillaires partiellement vides).

Les solutions récupérées seront généralement recueillies par prélèvements fractionnés, ce qui permettra de suivre l'évolution de leur concentration en NaCl au cours de l'égouttage et d'étudier notamment le voisinage du front de contact entre la solution d'imprégnation et la solution de lavage. Pour des raisons d'ordre analytique, les fractions prélevées ne pourront être inférieures à 100 cm³, et corrélativement le fractionnement ne présentera d'intérêt que pour les quantités de pulpe suffisamment importantes (hauteurs de sel égales ou supérieures à 10 cm). Précisons en outre que pour ne pas augmenter inutilement le nombre des analyses, les premières fractions soutirées dans le cas des pulpes à état initial "capillaires pleins", qui avaient évidemment la même composition que la solution d'imprégnation de la pulpe de départ, étaient réunies en un seul échantillon analysé globalement.

Concentration β_L en NaCl de la solution de lavage.

Nous opérons avec une solution de lavage à deux concentrations différentes en NaCl :

- a) Solution saturée en KCl ne contenant pas de NaCl ($\beta_L = 0$) ;
- b) Solution obtenue par mélange de quantités calculées de la première solution ($\beta_L = 0$) et de la solution d'imprégnation des pulpes ($\beta_0 = 214,4$ g/l NaCl), et ayant une concentration en NaCl très sensiblement égale aux $3/4$ de β_0 ($\beta_L \approx (3/4)\beta_0$) .

Vide de soutirage.

Le vide appliqué sous l'égoutteuse conditionne le débit de soutirage des solutions. Deux vides différents : 10 cm Hg et 30 cm Hg, ont été expérimentés.

Le vide de 10 cm Hg correspond au cas général et a été étudié en combinaison avec tous les autres paramètres du lavage.

Le vide de 30 cm Hg a été utilisé uniquement pour les hauteurs de sel de 10 cm (capillaires pleins et capillaires partiellement vides, avec les deux concentrations $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$) et 40 cm (capillaires pleins et capillaires partiellement vides et $\beta_L = 0$).

L'ajustement à une valeur précise des fractions de solutions recueillies est évidemment plus difficile pour le vide de 30 cm Hg que pour le vide de 10 cm Hg (surtout pour la hauteur de sel de 10 cm), du fait de l'augmentation de la vitesse de filtration des solutions.

Hauteur de sel dans l'égoutteuse.

Nous avons expérimenté les hauteurs de sel de 5 - 10 - 20 - 40 cm. A ces hauteurs correspondent des masses proportionnelles de sel préparé (d'humidité 2,63 % H₂O) respectivement égales à : 680 - 1360 - 2720 - 5440 grammes.

Il convient d'ailleurs de noter qu'au cours d'un même essai, la masse de sel est un invariant et n'intervient pas en fait dans les calculs de lavage.

Hauteur de sel : 5 cm.

Ce cas se rapproche de celui du lavage d'un gâteau obtenu par filtration sous vide, soit au laboratoire sur büchner, soit industriellement sur filtre rotatif.

Il est à noter que le voisinage du front de contact entre solution d'imprégnation et solution de lavage ne peut être étudié ici de manière précise, parce qu'il est impossible - tout au moins pour l'état initial à capillaires partiellement vides - d'effectuer le fractionnement de la solution recueillie dans la zone correspondante, à cause des faibles quantités de solution d'imprégnation mises en jeu. En effet, pour l'état initial à capillaires partiellement vides ($a_0 = 100 \text{ cm}^3$), la 1^{ère} fraction recueillie se trouve déjà dans la zone d'interpénétration des deux solutions et a par suite une concentration inférieure à la concentration initiale. Pour l'état initial à capillaires pleins, le fractionnement aurait pu à la rigueur être effectué mais était compliqué du fait que le volume de solution d'imprégnation ($a_0 = 250 \text{ cm}^3$) n'était pas multiple de la fraction élémentaire de 100 cm^3 . En conséquence, pour tous les essais qui se rapportent à cette hauteur de sel de 5 cm, que l'état initial de la pulpe soit à capillaires pleins ou à capillaires partiellement vides, nous avons effectivement opéré en lavage équilibré (volume de solution de lavage égal au volume de solution résiduelle). Ces essais étaient effectués aux deux concentrations en NaCl de la solution de lavage $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$, avec le vide de soutirage de 10 cm Hg.

Hauteur de sel : 10 cm.

Pour cette hauteur de sel de 10 cm, chacun des paramètres énumérés a été expérimenté en combinaison avec tous les autres. Afin de pouvoir explorer en totalité la zone du front de contact entre les deux solutions, tous ces essais ont été effectués avec un grand excès de solution de lavage.

Hauteur de sel : 20 cm.

Chronologiquement, cette hauteur de sel a été examinée immédiatement après celle de 5 cm, et dans les mêmes conditions opératoires (si ce n'est que dans le cas présent, les solutions recueillies ont pu l'être par quantités fractionnées). Toutefois, dans une série d'essais supplémentaires effectués successivement aux deux

états initiaux de la pulpe à capillaires pleins et à capillaires partiellement vides et aux concentrations de la solution de lavage $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_o$, nous nous sommes placé, pour les raisons déjà mentionnées (exploration de la totalité de la zone de front de contact), dans les conditions opératoires d'un lavage nettement déséquilibré par excès.

Hauteur de sel : 40 cm.

Cette hauteur de sel de 40 cm n'était pas prévue initialement. Cependant, au cours des essais, il est apparu intéressant de l'expérimenter afin d'avoir un domaine de variation de la hauteur de sel plus important par rapport à la plus faible hauteur (10 cm) pour laquelle le fractionnement des solutions pouvait être effectué. Nous avons de ce fait dû rallonger notre égoutteuse (fixation à la partie supérieure d'un manchon en verre collé à l'aide d'un ciment spécial) pour qu'elle puisse contenir la solution de lavage surmontant le sel dans l'égoutteuse.

Nous avons examiné les mêmes paramètres que pour la hauteur de sel de 10 cm, sauf que la plus forte concentration en NaCl de la solution de lavage ($\beta_L = (3/4)\beta_o$) n'a pas été étudiée pour le vide de 30 cm Hg, aussi bien pour l'état initial de la pulpe à capillaires pleins qu'à capillaires partiellement vides. L'influence du vide (10 ou 30 cm Hg) pour la hauteur de sel de 40 cm était en effet déjà peu marquée pour la concentration $\beta_L = 0$ de la solution de lavage.

4) Caractérisation des résultats

Etant donnés les volumes et les concentrations moyennes en soluté (NaCl) : (a_o, β_o) de la solution d'imprégnation initiale ; (L, β_L) de la solution de lavage ; (E_1, β_1') de la solution récupérée ; (a_1, β_1'') de la pulpe finale, nous disposons, pour caractériser globalement l'opération de lavage, de deux coefficients principaux, qui sont le rendement effectif de lavage proprement dit (facteur de quantité) :

$$R = \frac{E_1(\beta_1' - \beta_L)}{a_o(\beta_o - \beta_L)} \quad (162)$$

et la concentration relative de la solution récupérée (facteur de qualité) :

$$\rho = \frac{\beta_1' - \beta_L}{\beta_o - \beta_L} \quad (163)$$

les expressions qui correspondent au cas d'un lavage avec une solution de concentration nulle en soluté (NaCl) s'obtenant en faisant simplement $\beta_L = 0$.

Le rendement de lavage proprement dit de l'opération, dans le cas d'un lavage par dilution à homogénéisation complète serait (le soluté se répartissant alors entre l'extract et la pulpe résiduelle proportionnellement aux volumes de solutions) :

$$R_{\text{dil.}} = \frac{E_1}{a_o + L} = \frac{a_o + L - a_1}{a_o + L} = 1 - \frac{a_1}{a_o + L} \quad (164)$$

et on aurait de même pour la concentration relative de la solution récupérée :

$$\rho_{\text{dil.}} = \frac{a_o}{a_o + L} \quad (165)$$

Le rendement de lavage et la concentration relative varient évidemment en sens inverses en fonction de la quantité de solution de lavage utilisée.

Dans le cas d'un lavage équilibré ($E_1 = a_0$ ou $L = a_1$), les rendements s'identifient aux concentrations relatives correspondantes de la solution récupérée (+). On a alors pour le rendement de lavage proprement dit :

$$R = \rho = \frac{\beta_1' - \beta_L}{\beta_0 - \beta_L} \quad (166)$$

et pour le rendement du lavage par dilution à homogénéisation complète :

$$R_{\text{dil.}} = \rho_{\text{dil.}} = \frac{a_0}{a_0 + a_1} \quad (167)$$

Par ailleurs, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, un étage unique de lavage équilibré permettrait, dans le cas théorique d'un déplacement parfait ($\beta_1' = \beta_0$; $\beta_1'' = \beta_L$), la récupération intégrale de la solution d'imprégnation de la pulpe initiale en quantité et qualité ($R = \rho = 1$ ou 100 %). La connaissance du rendement effectif de lavage équilibré donne donc la possibilité, d'une part de juger à la fois en quantité et qualité du degré de perfection de l'opération par rapport au déplacement parfait, et d'autre part de comparer le rendement du lavage par déplacement au rendement du lavage par dilution à homogénéisation complète effectué dans des conditions analogues.

Quant au coefficient de déplacement (coefficient compris entre 0 et 1), il devient ici (++) :

$$\tau = \frac{\beta_1' - \beta_1''}{\beta_1' - \beta_L} = \frac{\beta_1' - \beta_L - (\beta_1'' - \beta_L)}{\beta_1' - \beta_L} = 1 - \frac{\beta_1'' - \beta_L}{\beta_1' - \beta_L} \quad (168)$$

Les valeurs des coefficients de déplacement obtenus n'ont été calculées qu'à seul titre indicatif. En effet, la connaissance de ces coefficients (qui n'ont pas, dans le cas général d'un lavage quelconque, une signification physique bien évidente) est surtout intéressante lorsqu'on a affaire à une installation continue à multi-étages, puisqu'elle permet de traiter le problème du lavage par des équations analogues à celles établies pour le lavage par dilution à homogénéisation complète correspondant. Dans le cas présent, l'intérêt des coefficients de déplacement est diminué du fait de l'analyse précise que nous avons pu faire du phénomène de déplacement, en fractionnant les solutions récupérées.

Il est à noter que le rendement R , la concentration relative ρ et le coefficient de déplacement τ ne dépendent que des paramètres (a_0 , a_1 , L) du lavage, et du déplacement réalisé, et sont indépendants des concentrations β_0 et β_L mises en jeu (bien que les concentrations β_1' et β_1'' soient elles-mêmes fonctions de β_0 et β_L , et que la précision avec laquelle on connaît ces coefficients doive normalement diminuer à mesure que β_L se rapproche de β_0). En d'autres termes, si pour des solutions de lavage de concentrations différentes on observe - toutes choses égales par ailleurs - une variation de ces coefficients, c'est que la concentra-

(+) Ainsi, pour un lavage équilibré effectué avec une solution de concentration en soluté $\beta_L = 0$, un rendement de lavage de 80 % signifie que l'on récupère 80 % du soluté présent dans la pulpe initiale, sous forme d'une solution dont la concentration est les 80 % de celle de la solution d'imprégnation de cette pulpe initiale.

(++) Dans le cas où $\beta_L = 0$, l'expression de τ se réduit à :

$$\tau = 1 - \frac{\beta_1''}{\beta_1'}$$

tion β_L aura agi physiquement sur la qualité du déplacement, par suite de phénomènes de diffusion différents par exemple.

Il convient en outre de remarquer qu'il n'est pas toujours possible de comparer valablement deux opérations de lavage en utilisant un seul coefficient, fût-ce le rendement de lavage équilibré. Ainsi, pour une même hauteur de sel dans l'égoutteuse, on ne peut établir de comparaison utile entre les rendements obtenus pour les deux états initiaux de la pulpe "à capillaires pleins" et "à capillaires partiellement vides", car l'état final étant dans les deux cas "à capillaires partiellement vides", on aboutit obligatoirement - toutes choses égales par ailleurs - à un rendement plus élevé dans le premier cas que dans le second. On pourra alors confronter les degrés de perfection des deux lavages en considérant les concentrations en NaCl (β_1') des solutions d'imprégnation des pulpes finales. Inversement, les valeurs de ces concentrations ne reflètent en rien les perfections comparées des opérations lorsqu'on expérimente des solutions de lavage à des concentrations $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$ différentes, la concentration finale étant nécessairement plus élevée dans le second cas que dans le premier.

D'ailleurs, les divers facteurs que nous avons considérés ne caractérisent que le résultat global de l'opération de lavage. Le processus précis du déplacement ne peut être effectivement perçu que par l'analyse de la zone du front de contact entre la solution d'imprégnation de la pulpe et la solution de lavage. Les courbes des fronts de contact ne peuvent toutefois être valablement comparées entre elles qu'autant que les solutions de lavage sont à une même concentration β_L . D'autre part, en fonction d'un paramètre particulier, il peut paradoxalement arriver que le rendement du lavage augmente alors que la qualité du déplacement va en diminuant (c'est le cas pour la hauteur de sel dans l'égoutteuse).

Tout ce que nous venons de dire montre la complexité de l'interprétation et de la comparaison des résultats obtenus en fonction des divers paramètres étudiés.

5) Présentation des résultats

Nous indiquons dans les tableaux I à IV, pour chaque hauteur de sel dans l'égoutteuse et pour les différentes conditions opératoires, les valeurs des concentrations en NaCl des diverses fractions recueillies des solutions récupérées (ou extraits).

On peut estimer que les concentrations en NaCl consignées dans ces tableaux, sont connues avec une précision de l'ordre de 0,5 g/l, l'erreur relative allant en décroissant à mesure que la concentration augmente.

Pour permettre une comparaison plus aisée des résultats, nous avons en outre calculé et fait figurer simultanément sur les tableaux V à VII les valeurs des grandeurs caractéristiques obtenues pour les 4 hauteurs de sel et se rapportant à un lavage équilibré, à savoir :

Tableau V : Concentrations globales β_1' des solutions récupérées et β_1'' des solutions d'imprégnation résiduelles (en g/l NaCl).

Etant donné les très légères variations des concentrations en NaCl dont sont affectées les solutions d'imprégnation des pulpes initiales et des solutions de lavage (différences maximales de l'ordre de 1,5 - 2 g/l), la comparaison des concentrations β_1' et β_1'' indiquées dans ce tableau n'est pas toujours absolument significative pour des hauteurs de sel différentes. Cependant, pour les hauteurs de 10 et

40 cm, les solutions mentionnées étaient rigoureusement identiques pour les deux états initiaux des pulpes et pour un même vide de soutirage (voir tableaux II et IV).

Tableau VI : Rendements effectifs R de lavage. Nous indiquons parallèlement, au bas de ce tableau, les rendements des lavages par dilution à homogénéisation complète correspondants ($R_{dil.}$). Ces derniers rendements seraient, pour les 4 hauteurs de sel, de 50 % dans le cas où les pulpes sont initialement à capillaires partiellement vides (les volumes des solutions d'imprégnation finales étant alors égaux aux volumes des solutions d'imprégnation initiales, les lavages correspondants sont en effet à équi-épaississement). Ils seraient de 71,43 % pour les hauteurs de sel de 5 - 10 - 20 cm, et de 70,37 % pour la hauteur de sel de 40 cm, lorsque les pulpes sont initialement à capillaires pleins (la valeur élevée de ces derniers rendements s'explique par le fait que les lavages sont alors à épaississements croissants ; la légère différence relative à la hauteur de sel de 40 cm provient de ce que la quantité de solution d'imprégnation de la pulpe à capillaires pleins ne reste pas dans ce cas tout à fait proportionnelle à la hauteur de sel).

Tableau VII : Coefficients τ de déplacement.

Par ailleurs, nous avons représenté graphiquement sur les figures 36 à 45, pour les différentes hauteurs de sel et les différents états initiaux des pulpes et vides de soutirage, les valeurs de la concentration en NaCl des diverses fractions recueillies des solutions récupérées, en rassemblant sur une même figure les résultats se rapportant aux deux concentrations $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$ de la solution de lavage (cette dernière concentration correspond à la partie ombrée de la figure). A partir de la représentation discontinue constituée par les "histogrammes" ainsi obtenus, nous avons tracé par interpolation les "courbes des fronts de contact" indiquant de manière continue les valeurs des concentrations NaCl des solutions recueillies.

Dans un deuxième stade, nous avons groupé ces courbes continues, en examinant d'abord l'influence de la hauteur de sel (de 10 à 40 cm) successivement à capillaires pleins et à capillaires partiellement vides, pour le vide de soutirage de 10 cm Hg et pour les concentrations de la solution de lavage $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$ (fig. 46 à 49) ; puis l'influence de l'état initial de la pulpe et du vide de soutirage, pour les hauteurs de sel de 10, 20 et 40 cm et les concentrations de la solution de lavage $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$ (fig. 50 à 55). Pour faciliter la comparaison des divers résultats nous avons, pour toutes les courbes, fait coïncider sur l'axe des abscisses les volumes soutirés correspondant chaque fois aux lavages équilibrés (pour lesquels le volume de solution récupérée est égal au volume de solution d'imprégnation initial). La pente et la forme de ces différentes courbes reflètent la qualité du déplacement obtenu dans chaque cas (un déplacement parfait serait représenté par une droite verticale d'abscisse égale au volume d' "équilibre").

Enfin, nous avons représenté sur la figure 57 les débits de soutirage aux deux vides de 10 et 30 cm Hg pour les hauteurs de sel de 10 et 40 cm, l'état initial de la pulpe à capillaires pleins et la concentration $\beta_L = 0$ de la solution de lavage. Les changements de pente observés sur les courbes au voisinage des fronts de contact (c'est-à-dire quand on a soutiré un volume de solution égal à celui de la solution d'imprégnation) proviennent des différences de viscosités entre la solution d'imprégnation et la solution de lavage. Ces viscosités, mesurées à 25°C au moyen d'un viscosimètre à tube capillaire, ont été trouvées égales à :

Solution d'imprégnation initiale	:	1,633 centipoises
Solution de lavage $\beta_L = 0$	:	1,008 "
Solution de lavage $\beta_L = (3/4)\beta_0$	:	1,395 "

b) Interprétation des résultats. Influence des différents paramètres

Hauteur de sel dans l'égoutteuse.

L'analyse des fronts de contact entre solution d'imprégnation et solution de lavage pour les hauteurs de sel de 10, 20 et 40 cm (rappelons que pour la hauteur de sel de 5 cm aucun fractionnement n'a été effectué) est représentée sur les figures 46 à 49. Il apparaît que la pente de la courbe de front de contact, qui traduit l'étalement de la zone d'interpénétration des deux solutions, croît dans tous les cas à mesure que la hauteur de sel augmente, aussi bien pour $\beta_L = 0$ que pour $\beta_L = (3/4)\beta_0$. Autrement dit, le phénomène de déplacement est d'autant moins parfait que la hauteur de sel dans l'égoutteuse est plus grande, le phénomène étant plus accentué, tout au moins pour $\beta_L = 0$, à capillaires pleins qu'à capillaires partiellement vides. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'au cours du soutirage, la durée de contact dynamique entre la solution d'imprégnation et la solution de lavage est évidemment d'autant plus prolongée que la hauteur de sel est plus grande et que, pour une même hauteur de sel, la quantité de solution d'imprégnation est plus importante (suivant l'état initial de la pulpe).

Par ailleurs, on constate (tableau VI) que le rendement effectif de lavage équilibré croît régulièrement avec la hauteur de sel dans l'égoutteuse, passant en moyenne (pour les deux concentrations de la solution de lavage $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$ et le vide de soutirage de 10 cm Hg) de 94,21 à 96,30 % pour l'état initial à capillaires pleins et de 81,96 à 92,21 % pour l'état initial à capillaires partiellement vides, quand on va de la hauteur de 5 cm à la hauteur de 40 cm (fig. 56). L'accroissement du rendement en fonction de la hauteur de sel provient de ce que la zone d'interpénétration au front de contact des deux solutions, qui augmente avec cette hauteur de sel, ne croît pas proportionnellement à cette dernière, de sorte que son influence relative va en décroissant.

Les concentrations en g/l NaCl (β_1) des solutions d'imprégnation finales (tableau V) varient évidemment en sens inverse du rendement et diminuent, pour les mêmes raisons, quand la hauteur de sel augmente.

Quantité a_0 de solution d'imprégnation de la pulpe (état initial).

Rappelons que l'état initial de la pulpe peut être "à capillaires pleins" ou "à capillaires partiellement vides".

Nous avons représenté sur les figures 50 à 55 l'influence de l'état initial, respectivement pour les hauteurs de sel dans l'égoutteuse de 10, 20 et 40 cm, avec éventuellement deux vides de soutirage (10 et 30 cm Hg).

Parmi les valeurs numériques calculées, les concentrations β_1 en NaCl des solutions d'imprégnation finales (tableau V) sont certainement, dans le cas présent, pour une même concentration β_L de la solution de lavage, les grandeurs les plus caractéristiques de la qualité du déplacement (les rendements de lavage sont en effet, toutes choses égales par ailleurs, obligatoirement plus élevés à capillaires pleins qu'à capillaires partiellement vides)(+).

On constate que pour le vide de 10 cm Hg et les hauteurs de sel de 5 et 10 cm, le déplacement est meilleur à capillaires pleins qu'à capillaires partiellement vides, aussi bien pour $\beta_L = 0$ que pour $\beta_L = (3/4)\beta_0$ (quoique le phénomène soit plus atténué pour cette dernière concentration de la solution de lavage).

(+) Il est à noter que dans le cas d'un lavage par dilution, les concentrations β_1 varieraient, par contre, comme les rendements, en fonction de l'état initial de la pulpe.

Pour les hauteurs de sel de 20 et 40 cm le résultat est inversé, le déplacement étant cette fois meilleur à capillaires partiellement vides qu'à capillaires pleins (la différence est toutefois encore moins accentuée que précédemment lorsque $\beta_L = (3/4)\beta_0$).

La différence de comportement de l'état initial de la pulpe en fonction de la hauteur de sel peut s'expliquer de la manière suivante. Le front de contact est mieux délimité au départ et les chemins préférentiels moins marqués à capillaires pleins qu'à capillaires partiellement vides, ce qui entraîne la supériorité du premier état initial pour les faibles hauteurs de sel. Ces conditions subsistent pour les hauteurs de sel plus élevées, mais la durée de contact dynamique, qui augmente, en même temps que l'effet de diffusion, à mesure que croît la hauteur de sel, joue évidemment en défaveur de l'état initial à capillaires pleins et entraîne l'inversion du phénomène à un certain moment.

Ceci explique d'ailleurs que les rendements moyens de lavage augmentent en fonction de la hauteur de sel plus rapidement à capillaires partiellement vides qu'à capillaires pleins, tout en restant évidemment toujours moins élevés dans le premier cas que dans le second (fig. 56).

Quantité L de solution de lavage.

Le rendement de lavage (lavage déséquilibré) croît évidemment (en même temps que la concentration relative de la solution récupérée diminue) quand on augmente la quantité de solution de lavage utilisée. Mais, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, la qualité du déplacement est, pour un lavage déséquilibré par excès, indépendante de cette quantité de solution de lavage (bien qu'un volume de solution supérieur à celui qui correspond au lavage équilibré soit nécessaire pour explorer la totalité de la zone de front de contact). C'est bien entendu pour un lavage équilibré que le rendement reflète le mieux la plus ou moins grande perfection du déplacement.

Concentration β_L en NaCl de la solution de lavage.

Rappelons que deux concentrations en NaCl de la solution de lavage : $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$, ont été expérimentées.

L'influence de la concentration en NaCl de la solution de lavage sur la qualité du déplacement a été examinée dans un seul but spéculatif. Il est en effet évident a priori qu'on a intérêt, pour enrichir le chlorure de potassium, à utiliser une solution de lavage ayant une concentration nulle en NaCl.

Il est à noter que dans le cas présent, la comparaison des fronts de contact obtenus avec les deux concentrations de la solution de lavage est pratiquement impossible. Les courbes correspondantes n'ont en effet pas du tout la même allure du fait que la différence de concentration entre la solution d'imprégnation initiale et la solution de lavage est environ quatre fois plus faible dans le cas $\beta_L = (3/4)\beta_0$ que dans le cas $\beta_L = 0$.

En ce qui concerne les caractéristiques numériques du lavage, les concentrations en NaCl (β_L) des solutions d'imprégnation finales sont bien entendu nécessairement plus élevées pour $\beta_L = (3/4)\beta_0$ que pour $\beta_L = 0$, et en pratique le seul coefficient vraiment représentatif de la qualité du déplacement reste le rendement de lavage.

On constate que pour le vide de soutirage de 10 cm Hg, le rendement est toujours plus élevé pour $\beta_L = (3/4)\beta_0$ que pour $\beta_L = 0$, la différence étant nettement plus accentuée à capillaires partiellement vides qu'à capillaires pleins et passant par un maximum pour une certaine hauteur de sel dans l'égoutteuse.

La croissance du rendement lorsque la concentration en NaCl de la solution de lavage augmente s'explique par le fait que les phénomènes de diffusion au voisinage du front de contact des deux solutions vont en diminuant à mesure que β_L se rapproche de β_0 (+). D'autres phénomènes accessoires (augmentation de la densité et de la viscosité de la solution de lavage quand β_L augmente) peuvent également intervenir, le facteur diffusion apparaissant de beaucoup le plus important.

Vide de soutirage.

Le vide conditionne, pour une hauteur de sel donnée, le débit de soutirage des solutions.

Les essais n'ont été effectués aux deux vides de soutirage de 10 et 30 cm Hg en liaison avec tous les autres paramètres du lavage (c'est-à-dire pour les deux états initiaux de la pulpe et les deux concentrations en NaCl de la solution de lavage) que pour la hauteur de sel de 10 cm. Les mêmes essais ont eu lieu pour la hauteur de sel de 40 cm, mais à la seule concentration $\beta_L = 0$ de la solution de lavage.

On constate que pour les essais à faible hauteur de sel (10 cm), le déplacement est toujours meilleur avec le vide de 10 cm Hg qu'avec le vide de 30 cm Hg (fig. 50 et 53 et tableau VI), c'est-à-dire que l'on a toujours intérêt à effectuer le soutirage le plus lentement possible. L'effet de turbulence (d'autant plus important que le débit d'écoulement est plus grand) l'emporte donc sur l'effet de diffusion (qui augmente en même temps que la durée de contact dynamique entre la solution d'imprégnation et la solution de lavage).

Pour la hauteur de sel de 40 cm (fig. 52 et tableau VI), le phénomène varie dans le même sens que pour la hauteur de 10 cm, mais est nettement moins accentué. Ceci provient de ce que l'influence du vide est beaucoup moins sensible pour les grandes hauteurs de sel que pour les faibles hauteurs, par suite de la résistance plus élevée opposée à l'écoulement des solutions. On déduit effectivement des courbes de la figure 57 que les débits de soutirage de la solution d'imprégnation (état initial à capillaires pleins) varient à peu près de 120 à 250 cm³/mn pour la hauteur de sel de 10 cm et de 105 à 180 cm³/mn pour la hauteur de sel de 40 cm, quand on passe du vide de 10 cm Hg au vide de 30 cm Hg. L'effet de la turbulence s'atténue donc avec la hauteur de sel, puisque pour un même vide les débits de soutirage sont moins élevés et que d'autre part la différence des débits correspondant aux deux vides décroît elle aussi quand la hauteur de sel augmente.

7) Conclusion

Il ressort de l'étude qui précède que parmi tous les paramètres expérimentés, les plus importants sont la hauteur de sel dans l'égoutteuse (paradoxalement d'ailleurs le déplacement est d'autant moins bon que la hauteur de sel est plus grande, tandis que le rendement de lavage croît régulièrement avec cette hauteur de sel) et le vide de soutirage (tout au moins pour les faibles hauteurs de sel), un vide élevé, c'est-à-dire un grand débit d'écoulement des solutions, se révélant toujours défavorable.

(+) On peut admettre que pour $\beta_L = \beta_0$ le déplacement existe encore physiquement bien qu'il ne soit plus décelable à partir des concentrations β_1' et β_1'' , qui sont alors égales à β_0 , le rendement R et le coefficient de déplacement τ prenant la forme indéterminée $\frac{0}{0}$.

L'influence de l'état initial de la pulpe (capillaires pleins ou capillaires partiellement vides) et celle de la concentration β_L en NaCl de la solution de lavage sont beaucoup moins marquées (l'influence que peut avoir β_L sur la qualité du déplacement est d'ailleurs toute théorique, car en pratique, on a évidemment intérêt à utiliser une solution de lavage la moins riche possible en NaCl). Quant à la quantité L de solution de lavage, le rendement de lavage croît naturellement avec elle (en même temps que diminue la concentration relative de la solution récupérée), bien que la qualité du déplacement proprement dit, pour un lavage déséquilibré par excès, en soit indépendante ; en pratique, du reste, la quantité de liquide de lavage disponible est toujours limitée.

De toute façon, les opérations de déplacement effectuées se caractérisent par l'excellence des rendements de lavage obtenus (avec un étage unique). Pour l'état initial des pulpes à capillaires partiellement vides (lavages à équi-épaississement équilibrés), les deux concentrations $\beta_L = 0$ et $\beta_L = (3/4)\beta_0$ de la solution de lavage et le vide de soutirage de 10 cm Hg, les rendements s'échelonnent entre 81,96 et 92,21 % quand on passe de la hauteur de sel de 5 cm à la hauteur de 40 cm. Dans le cas des lavages méthodiques par dilution à homogénéisation complète correspondants, les rendements afférents seraient de 50 % pour un étage unique, et il faudrait, pour atteindre les rendements précédents, respectivement 6 et 12 étages de lavage (+). Ceci met en évidence l'intérêt du lavage par déplacement, qui doit évidemment être préféré au lavage par dilution chaque fois que la nature de la pulpe à laver le permet.

°
° °

Industriellement, le chlorure de potassium séché standard, destiné à l'agriculture, a une teneur de l'ordre de 60 % K_2O (soit 95 % KCl). L'impureté contenue dans le sel humide avant séchage est constituée principalement par du NaCl (et une faible quantité de chlorures alcalino-terreux). Ce NaCl a deux origines : NaCl solide ayant cristallisé en même temps que le KCl ; NaCl dissous sous forme d'eau-mère d'imprégnation $H_2O-KCl-NaCl$. Pour certains usages spéciaux, on fabrique du chlorure de potassium à haute teneur (62,5 % K_2O , soit à peu près 99 % KCl) par lavage à l'eau du sel humide standard dans des égoutteuses industrielles. Une égoutteuse industrielle (type ALFELD) est constituée par une cuve cylindrique (hauteur 8 m ; diamètre 5 m) équipée d'un dispositif de raclage et munie d'un double fond. Le fond supérieur est fait d'un tapis en fibre de coco placé entre deux tôles perforées, à travers lesquels s'effectue l'égouttage du sel ; sur le fond inférieur se trouve une vanne dont l'ouverture permet le réglage du débit d'égouttage. On peut, dans une telle égoutteuse, traiter environ 150 tonnes de sel humide.

Outre la différence évidente d'échelle, l'enrichissement du chlorure de potassium dans une égoutteuse industrielle se distingue par différents points de l'enrichissement réalisé dans notre égoutteuse de laboratoire. D'abord, l'égouttage des pulpes se fait industriellement sous la seule influence de la pesanteur au lieu de s'effectuer sous l'effet du vide comme au laboratoire, les phénomènes de capillarité

(+) Rappelons que le rendement d'un lavage méthodique par dilution à équi-épaississement équilibré est donné par l'expression $R = \frac{n}{n+1}$, où n désigne le nombre d'étages.

étant relativement beaucoup moins importants du fait de la grande hauteur de sel. Par ailleurs, le NaCl présent dans les pulpes industrielles s'y trouve, ainsi que nous l'avons dit, à la fois à l'état dissous et à l'état solide, alors qu'il était en totalité à l'état dissous dans les pulpes utilisées pour les essais de laboratoire. Enfin, le liquide de lavage est industriellement constitué par de l'eau douce (ou à la rigueur par des solutions salines diluées), ce qui entraîne la dissolution d'une partie non négligeable de la masse du KCl (laquelle ne peut plus, en conséquence, être strictement considérée comme un invariant) et un refroidissement corrélatif des pulpes, qui modifie les solubilités. Malgré ces différences, les principes généraux qui régissent le lavage restent les mêmes dans les deux cas, et les renseignements fournis par les essais de laboratoire ont pu être transposés facilement à l'échelle industrielle.

Il est apparu que la meilleure manière de conduire une opération industrielle d'enrichissement était la suivante. L'égoutteuse étant remplie de pulpe venant de la cristallisation (mélange de chlorure de potassium et d'eau-mère), on laisse égoutter rapidement quelques instants de manière que l'eau-mère affleure le niveau du sel (état initial "à capillaires pleins"). On ferme alors la vanne d'égouttage et on ajoute au-dessus du sel, en une seule fois, toute l'eau nécessaire à l'enrichissement de ce sel à la teneur désirée. En jouant sur la vanne d'égouttage, on laisse alors écouler lentement la solution (débit n'excédant pas 5 m³/h) jusqu'à égouttage complet.

L'efficacité du mode opératoire adopté peut s'expliquer d'abord par le fait que l'état initial de la pulpe "à capillaires pleins" permet une répartition uniforme de l'eau de lavage sur toute la surface du sel. En outre, dans cet état initial "à capillaires pleins", la pulpe se distribue régulièrement à l'intérieur de l'égoutteuse, et on évite les chemins préférentiels dus aux crevasses dans la masse du sel ou au retrait de celui-ci le long de l'arbre central du racleur ou des parois de l'égoutteuse survenant ultérieurement au cours de l'opération d'égouttage (phénomènes qui ne se produisent pas dans l'égoutteuse de laboratoire). Par ailleurs, l'eau ajoutée pour le lavage dissout le sel qu'elle rencontre pour donner une solution riche en KCl. Cette solution ne pourra dissoudre le NaCl solide qu'après rejet d'une quantité correspondante de KCl à laquelle le NaCl se substitue, ce qui est une opération relativement lente, rendue possible par le faible débit d'égouttage ainsi réalisé. Le déplacement proprement dit de l'eau-mère d'imprégnation initiale et de la solution résultant de la dissolution du NaCl solide est effectué par la solution de KCl venant immédiatement à la suite au cours du processus d'égouttage.

Dans le mode opératoire antérieur, on ajoutait environ 60 m³ d'eau répartis en deux lavages successifs après égouttage du sel (donc chaque fois avec état initial de la pulpe "à capillaires partiellement vides"), selon une technique d'ailleurs incertaine. Le présent mode opératoire a permis de réduire cette quantité d'eau à 20-25 m³ (suivant la teneur du sel de départ) ajoutés en une seule fois à la pulpe "à capillaires pleins", ce qui représente un gain de 35 à 40 m³ d'eau et entraîne en même temps une simplification très nette des manoeuvres à effectuer.

TABLEAU I LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel dans l'égoutteuse: 5 cm
(Vide de soutirage : 10 cm Hg)

Etat initial		Capillaires Pleins		Capillaires partiellement Vides	
Concentration en NaCl de la solution de lavage		$\beta_L = 0$	$\beta_L \approx \frac{3}{4} \beta_0$	$\beta_L = 0$	$\beta_L \approx \frac{3}{4} \beta_0$
Solution d'impregnation initiale	$a_0 \text{ (cm}^3\text{)}$	250	250	100	100
	$\beta_0 \text{ (g/l NaCl)}$	212,5	212,5	212,5	212,5
Solution de lavage	$L \text{ (cm}^3\text{)}$	100	100	100	100
	$\beta_L \text{ (g/l NaCl)}$	0	158,6	0	158,6
Solution récupérée globale	Volume (cm ³)	250	250	100	100
	Conc g/l NaCl	200,1	209,4	171,7	203,4
Solution d'impregnation finale	Volume (cm ³)	100	100	100	100
	Conc. g/l NaCl	30,9	165,1	40,5	167,4

TABLEAU II

LAVAGE PAR DEPLACEMENT

EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel dans l'égoutteuse : 10 cm

Etat initial		Capillaires Pleins				Capillaires partiellement Vides					
Vide de soutirage		10 cm Hg		30 cm Hg		10 cm Hg		30 cm Hg			
Conc. NaCl sol. de lavage		$\beta_L = 0$	$\beta_L = 3/4 \beta_0$	$\beta_L = 0$	$\beta_L = 3/4 \beta_0$	$\beta_L = 0$	$\beta_L = 3/4 \beta_0$	$\beta_L = 0$	$\beta_L = 3/4 \beta_0$		
Solution d'impregnation initiale	β_0 (cm ³)	500	500	500	500	200	200	200	200		
	β_0 (g/l NaCl)	214,4	214,4	214,4	214,4	214,4	214,4	214,4	214,4		
Solution de lavage	L (cm ³)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000		
	β_L (g/l NaCl)	0	160,8	0	158,0	0	160,8	0	158,0		
Volumes et Concentrations des solutions récupérées	cm ³	g/l NaCl	g/l NaCl	cm ³	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	cm ³	g/l NaCl	g/l NaCl
	100	214,4	214,4	98	214,0	214,4	210,0	210,4	104	211,9	204,4
	100	214,4	214,4	102	213,2	214,4	138,8	202,4	100	114,8	201,9
	100	214,4	214,4	105	212,5	214,4	46,8	171,0	97	49,4	168,9
	100	214,4	214,4	100	198,2	200,2	14,6	163,7	100	24,7	160,2
	100	153,4	199,2	97	140,1	198,3	2,0	162,2	100	5,5	158,9
	100	36,6	168,1	99	49,8	167,7	0,9	161,5	102	1,9	158,0
	100	2,0	163,5	103	19,5	158,0	0,0	160,8	99	1,9	158,0
	100	2,0	162,6	100	3,2	158,0	0,0	160,8	99	0,0	"
	100	2,0	161,7	98	0,8	"	"	"	97	0,0	"
	100	0,0	160,8	100	0,0	"	"	"	102	"	"
	100	0,0	160,8	99	0,0	"					
	100	"	"	99	"	"					
	100	"	"	100	"	"					

TABLEAU III

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel dans l'égoutteuse : 20 cm

(Vide de soutirage : 10 cmHg)

Etat initial		Capillaires Pleins						Capillaires partiellement Vides					
Conc. NaCl sol. de lavage		$\beta_L = 0$			$\beta_L = 3/4 \beta_0$				$\beta_L = 0$		$\beta_L = 3/4 \beta_0$		
Solution d'imprégnation initiale	α_0 (cm ³)	1000	1000	1000	1000	1000	1000		400	400	400	400	
	β_0 (g/l NaCl)	213,3	213,3	213,3	213,3	213,3	213,3		213,3	213,3	213,3	213,3	
Solution de lavage	L (cm ³)	1000	1000	400	1000	1000	400		400	1000	400	1000	
	β_L (g/l NaCl)	0	0	0	159,3	159,3	159,3		0	0	159,3	159,3	
		cm ³	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	cm ³	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl
Volumes et Concentrations des solutions récupérées		500	213,0	213,3	213,3	213,0	213,0	212,7	100	212,8	212,7	212,8	212,8
		100	213,3	213,3	213,2	212,8	212,8	212,5	100	212,2	212,2	211,8	213,2
		100	213,2	212,6	211,8	213,0	213,0	213,0	100	206,9	204,2	210,0	210,0
		100	213,0	212,2	212,1	212,0	212,0	212,4	100	114,9	118,0	198,3	194,4
		100	197,4	205,3	201,4	211,3	211,3	211,6	100		55,7		171,2
		100	111,1	106,5	107,5	197,0	197,0	203,5	100		24,4		162,3
		100		54,4			168,6		100		19,2		161,6
		100		13,5			161,7		100		6,2		160,8
		100		2,4			159,6		100		0,4		160,3
		100		0,5			159,3		100		0,4		159,8
		100		0,0			159,3						
		100		0,0			"						

TABLEAU IV

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel dans l'égoutteuse: 40 cm

Etat initial		Capillaires Pleins			Capillaires partiellement Vides		
Vide de soutirage		10 cm Hg		30 cm Hg	10 cm Hg		30 cm Hg
Conc NaCl sol. de lavage		$\beta_L = 0$	$\beta_L = \frac{3}{4} \beta_0$	$\beta_L = 0$	$\beta_L = 0$	$\beta_L = \frac{3}{4} \beta_0$	$\beta_L = 0$
Solution d'impregnation initiale	α_0 (cm ³)	1900	1900	1900	800	800	800
	β_0 (g/l NaCl)	214,4	214,4	214,4	214,4	214,4	214,4
Solution de lavage	L (cm ³)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	β_L (g/l NaCl)	0	160,8	0	0	160,8	0
Volumes et Concentrations des solutions récupérées	cm ³	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl	g/l NaCl
	100	1000 cm ³	1000 cm ³	1000 cm ³	214,4	214,4	214,4
	100				"	"	"
	100				"	"	"
	100				"	"	"
	100				"	"	"
	100	1000 cm ³	1000 cm ³	1000 cm ³	212,0	"	206,6
	100				179,0	209,0	165,5
	100				113,2	188,1	104,0
	100				60,1	176,7	60,5
	100				21,6	171,7	38,4
	100	500 cm ³	500 cm ³	500 cm ³	7,4	164,4	21,8
	100				2,5	162,2	14,1
	100				1,4	160,8	8,2
	100				1,1	"	4,0
	100				0,0	"	0,0
	100	500 cm ³	500 cm ³	500 cm ³	214,4	214,4	208,0
	100				192,7	214,4	184,4
	100				158,9	206,4	162,4
	100				125,9	188,1	135,0
	100				74,9	169,9	90,7
	100	500 cm ³	500 cm ³	500 cm ³	29,2	162,6	57,6
	100				5,5	161,9	20,9
	100				3,6	160,8	2,9
	100				1,8	"	0,6
	100				0,9	"	0,0
	100	500 cm ³	500 cm ³	500 cm ³	0,9	"	"
	100				0,9	"	"
	100				0,0	"	"
	100				"	"	"
	100				"	"	"

TABLEAU V

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

(Cas d'un lavage équilibré)

Concentrations globales en g/l NaCl des solutions récupérées

(β'_1)

Hauteur de sel dans l'égoutteuse	Vide cm Hg	Capillaires Pleins		Capillaires partiellement Vides	
		Solution de lavage $\beta_L = 0$	Solution de lavage $\beta_L \approx 3/4 \beta_0$	Solution de lavage $\beta_L = 0$	Solution de lavage $\beta_L \approx 3/4 \beta_0$
5 cm	10	200,1	209,4	171,7	203,4
10 cm	10	202,2	211,4	174,4	206,4
	30	196,8	208,3	165,3	203,1
20 cm	10	201,6	211,1	186,7	207,6
40 cm	10	205,7	212,6	197,0	210,4
	30	205,6		193,5	

Concentrations en g/l NaCl des solutions d'imprégnation finales

(β''_1)

Hauteur de sel dans l'égoutteuse	Vide cm Hg	Capillaires Pleins		Capillaires partiellement Vides	
		Solution de lavage $\beta_L = 0$	Solution de lavage $\beta_L \approx 3/4 \beta_0$	Solution de lavage $\beta_L = 0$	Solution de lavage $\beta_L \approx 3/4 \beta_0$
5 cm	10	30,9	165,1	40,5	167,4
10 cm	10	30,5	168,4	40,0	168,8
	30	43,9	173,1	49,1	169,2
20 cm	10	29,2	164,8	26,6	165,0
40 cm	10	20,7	165,1	17,4	164,8
	30	20,9		20,9	

TABLEAU VI

LAVAGE PAR DEPLACEMENT
EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

(Cas d'un lavage équilibré)

Rendements effectifs de lavage

$$(R = \frac{\beta'_1 - \beta_L}{\beta_0 - \beta_L})$$

Hauteur de sel dans l'égoutteuse	Vide cmHg	Capillaires Pleins			Capillaires partiellement Vides		
		Solution de lavage $\beta_L = 0$	Solution de lavage $\beta_L = \frac{3}{4} \beta_0$	Moyennes	Solution de lavage $\beta_L = 0$	Solution de lavage $\beta_L = \frac{3}{4} \beta_0$	Moyennes
5 cm	10	94,17	94,25	94,21	80,80	83,12	81,96
10 cm	10	94,31	94,40	94,35	81,34	85,07	83,20
	30	91,79	89,18	90,48	77,09	79,96	78,53
20 cm	10	94,51	95,92	95,21	87,53	89,44	88,48
40 cm	10	95,96	96,64	96,30	91,88	92,54	92,21
	30	95,89		95,89	90,25		90,25

Rendements des lavages par dilution
correspondants

$$(R_{dil.} = \frac{a_0}{a_0 + a_1})$$

Hauteur de sel dans l'égoutteuse	Capillaires Pleins	Capillaires partiellement Vides
5, 10, 20 cm	71,43	50,00
40 cm	70,37	50,00

TABLEAU VII

LAVAGE PAR DEPLACEMENT
EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

(Cas d'un lavage équilibré)

Coefficients de déplacement

$$\left(\tau = \frac{\beta_1' - \beta_1''}{\beta_1' - \beta_L} \right)$$

Hauteur de sel dans l'égoutteuse	Vide cm Hg	Capillaires Pleins		Capillaires partiellement Vides	
		Solution de lavage $\beta_L = 0$	Solution de lavage $\beta_L \approx 3/4 \beta_0$	Solution de lavage $\beta_L = 0$	Solution de lavage $\beta_L \approx 3/4 \beta_0$
5 cm	10	0,8456	0,8720	0,6556	0,8036
10 cm	10	0,8492	0,8494	0,7707	0,8246
	30	0,7769	0,6998	0,7030	0,7517
20 cm	10	0,8552	0,8938	0,8575	0,8820
40 cm	10	0,8994	0,9170	0,9117	0,9194
	30	0,8984		0,8920	

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 10 cm.

Etat initial de la pulpe : Capillaires Pleins.

Vide de soutirage : 10cm Hg.

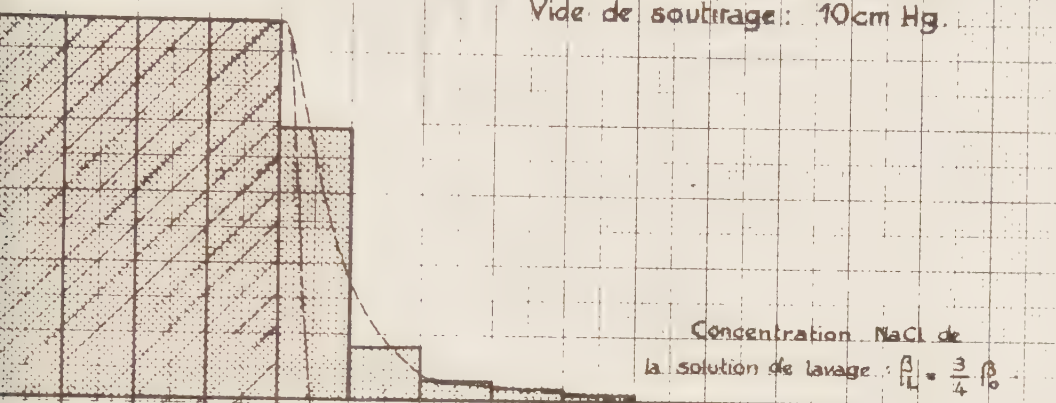


Fig. 36



LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 10 cm.

Etat initial de la pulpe : Capillaires partiellement vides.

Vide de soufflage : 10 cm Hg.

Concentration NaCl de
la solution de lavage $\beta = \frac{3}{4} \beta_0$

Fig. 37

Concentration NaCl de
la solution de lavage $\beta = 0$

(Equil.) 500 1000
Volumes de solution récupérée (cm³) →

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 10 cm.

Etat initial de la pulpe : Capillaires Pleins.

Vide de soutirage : 30 cm Hg.

Concentration NaCl de
la solution de lavage : $\beta_L = \frac{3}{4} \beta_0$

Fig. 38

Concentration NaCl de
la solution de lavage : $\beta_L = 0$

500
(Equil.)

Volumes de solution récupérée (cm³) → 1500

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 10 cm.
Etat initial de la pulpe : Capillaires partiellement Vides.
Vide de soutirage : 30 cm Hg.

Concentration NaCl de
la solution de lavage: $\beta = \frac{3}{4} \beta_0$

Fig. 39

Concentration NaCl de
la solution de lavage: $\beta = 0$

(Equil)

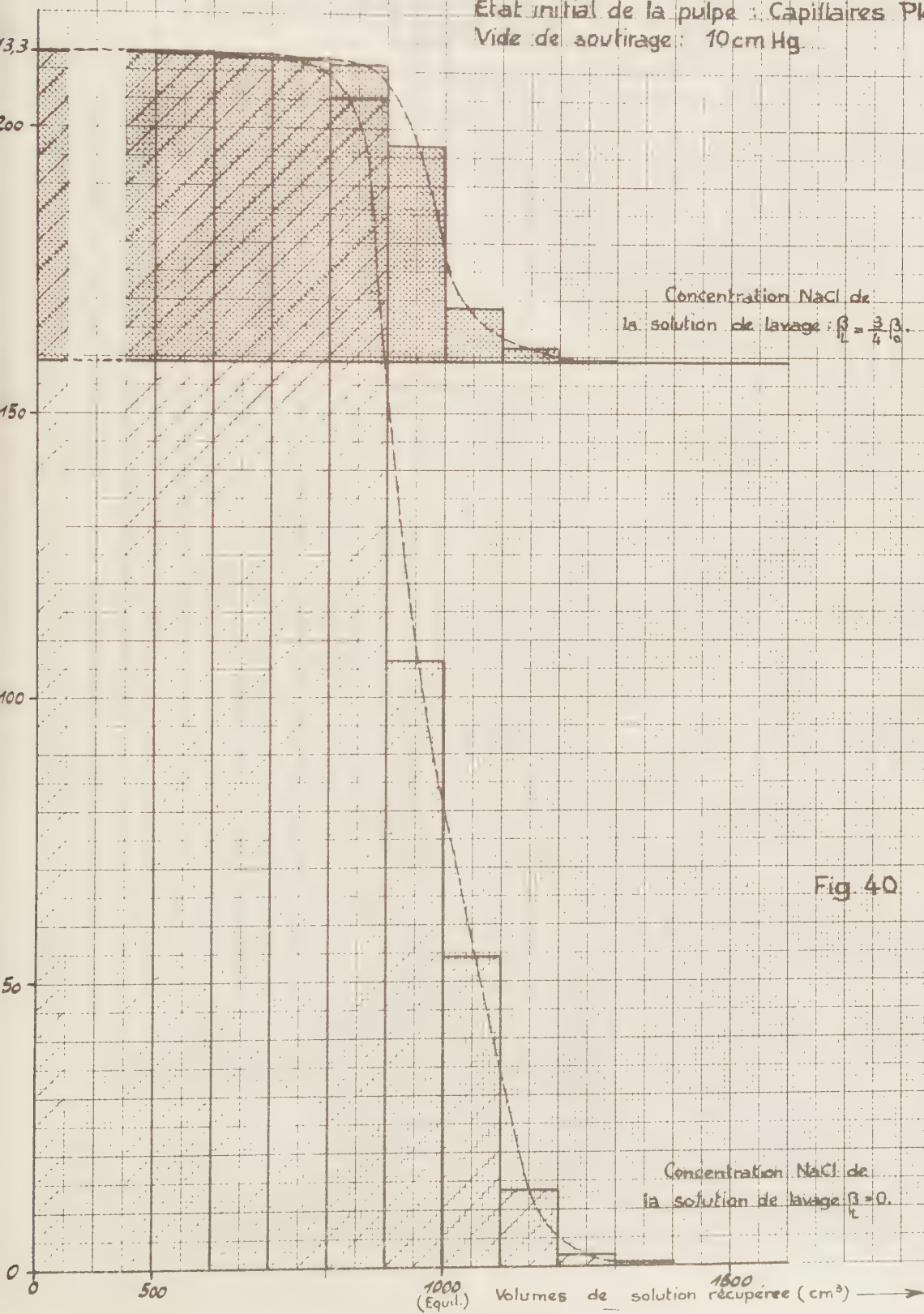
500 1000
Volumes de solution récupérée (cm³) →

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 20 cm.

Etat initial de la pulpe : Capillaires Pleins.

Vide de soutirage : 10 cm Hg.



LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 20 cm.

Etat initial de la pulpe : Capillaires partiellement Vides.

Vide de soutirage : 10 cm Hg.

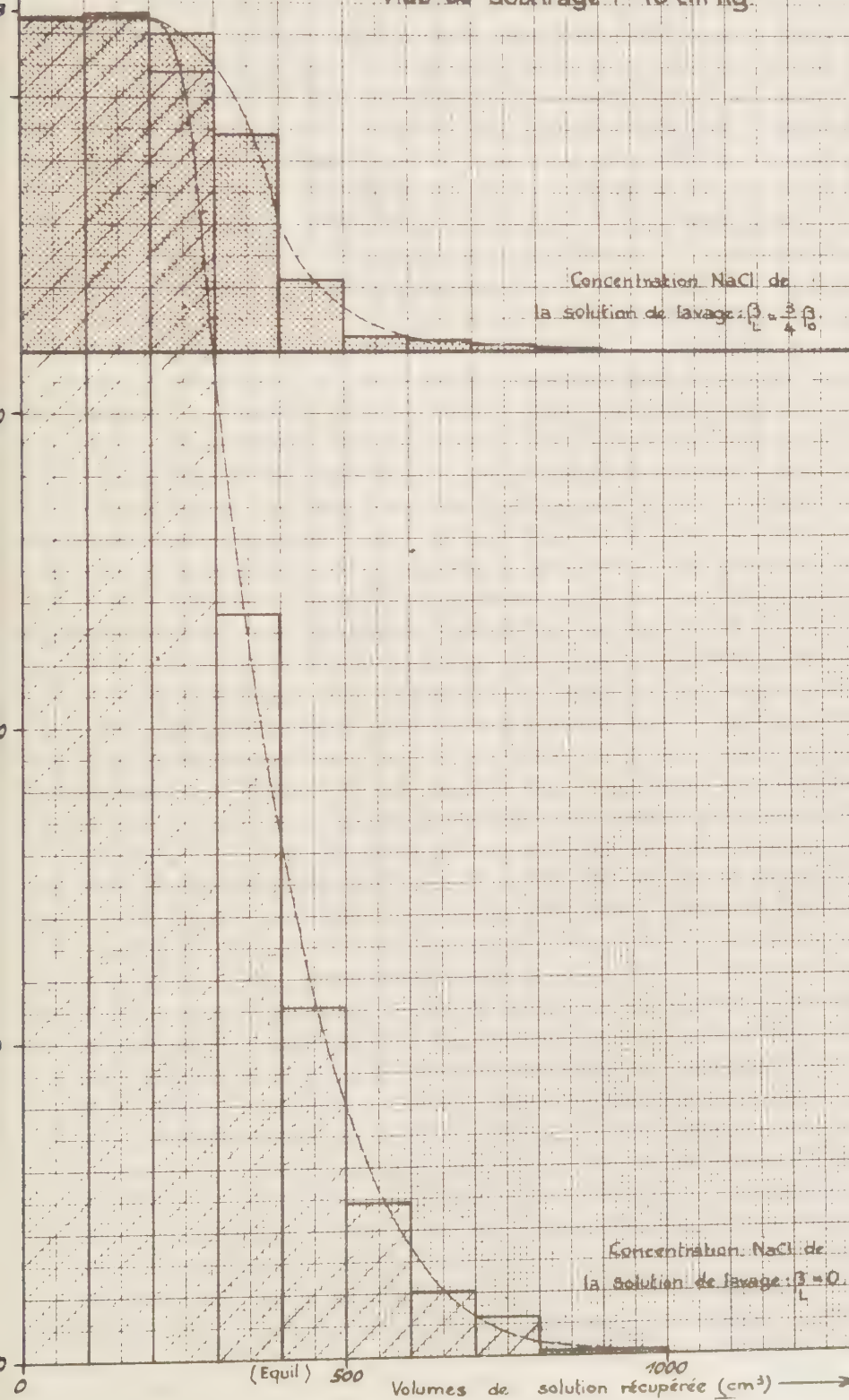


Fig. 41

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 40 cm.

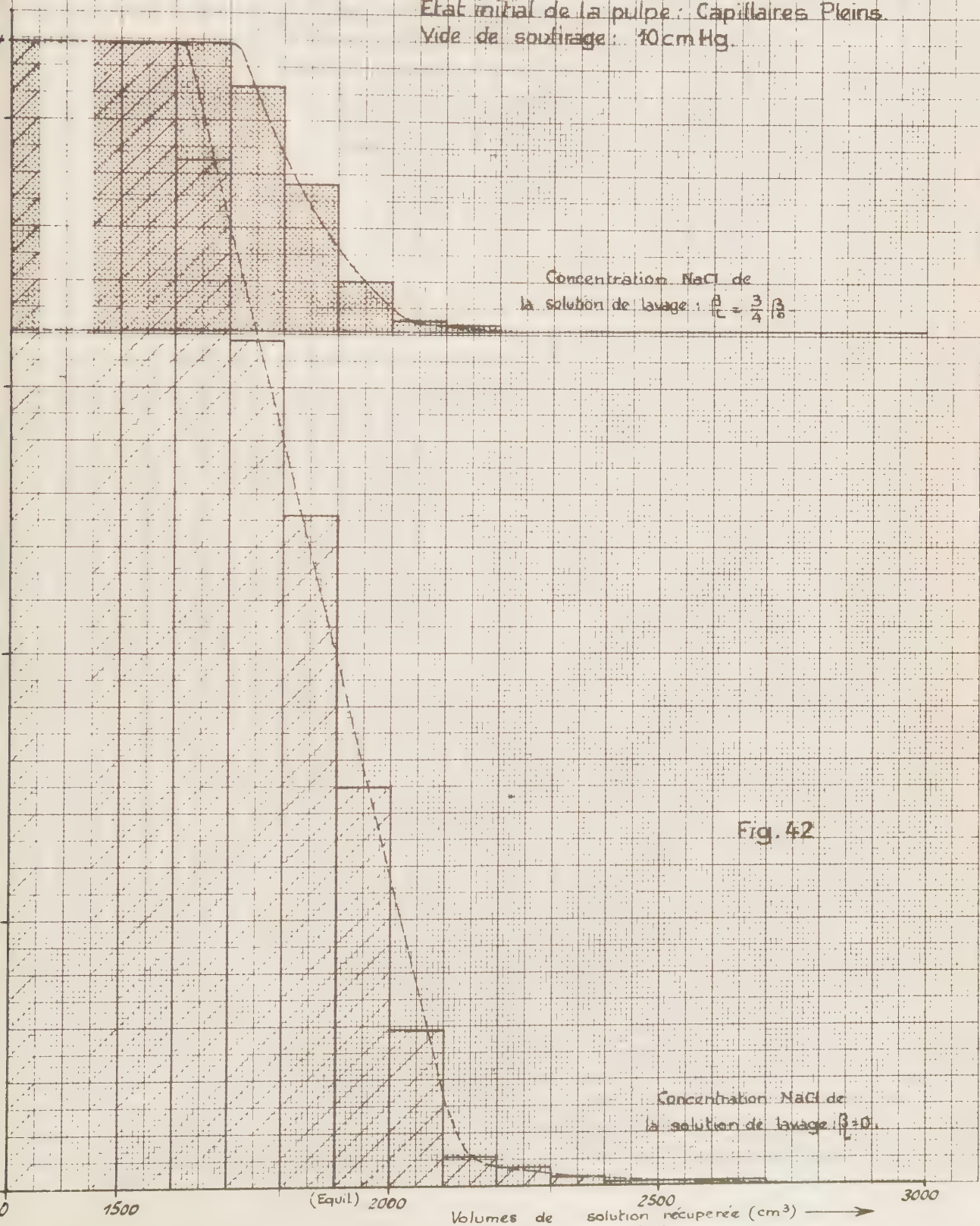
Etat initial de la pulpe : Capillaires Pleins.

Vide de soufflage : 10 cm Hg.

Concentration NaCl de
la solution de lavage : $\frac{B}{C} = \frac{3}{4} \frac{B}{B}$

Fig. 42

Concentration NaCl de
la solution de lavage : $\beta = 0$



LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 40 cm.

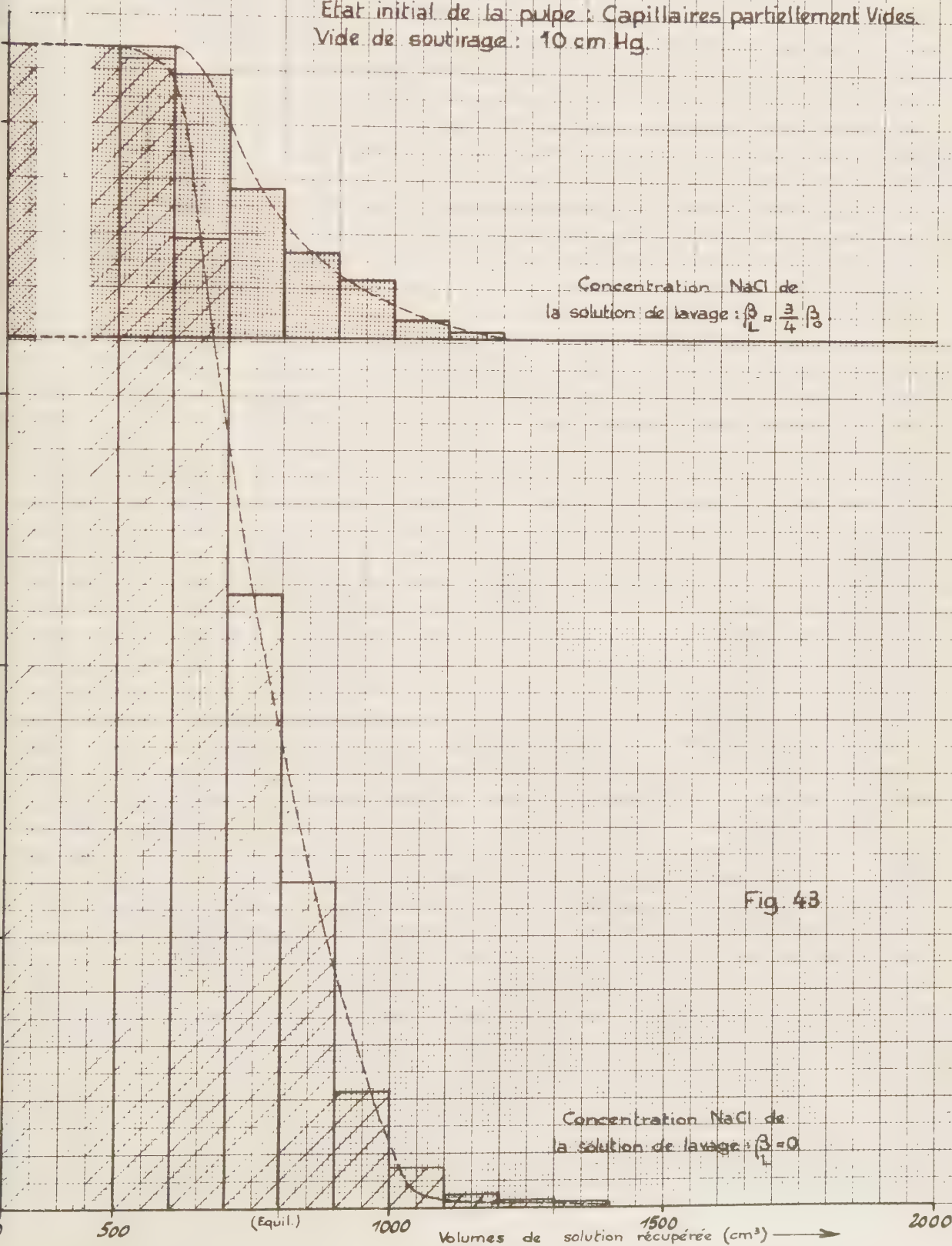
Etat initial de la pulpe : Capillaires partiellement Vides.

Vide de soutirage : 10 cm Hg.

Concentration NaCl de
la solution de lavage : $\beta_L = \frac{3}{4} \beta_0$

Fig. 43

Concentration NaCl de
la solution de lavage : $\beta_L = 0$

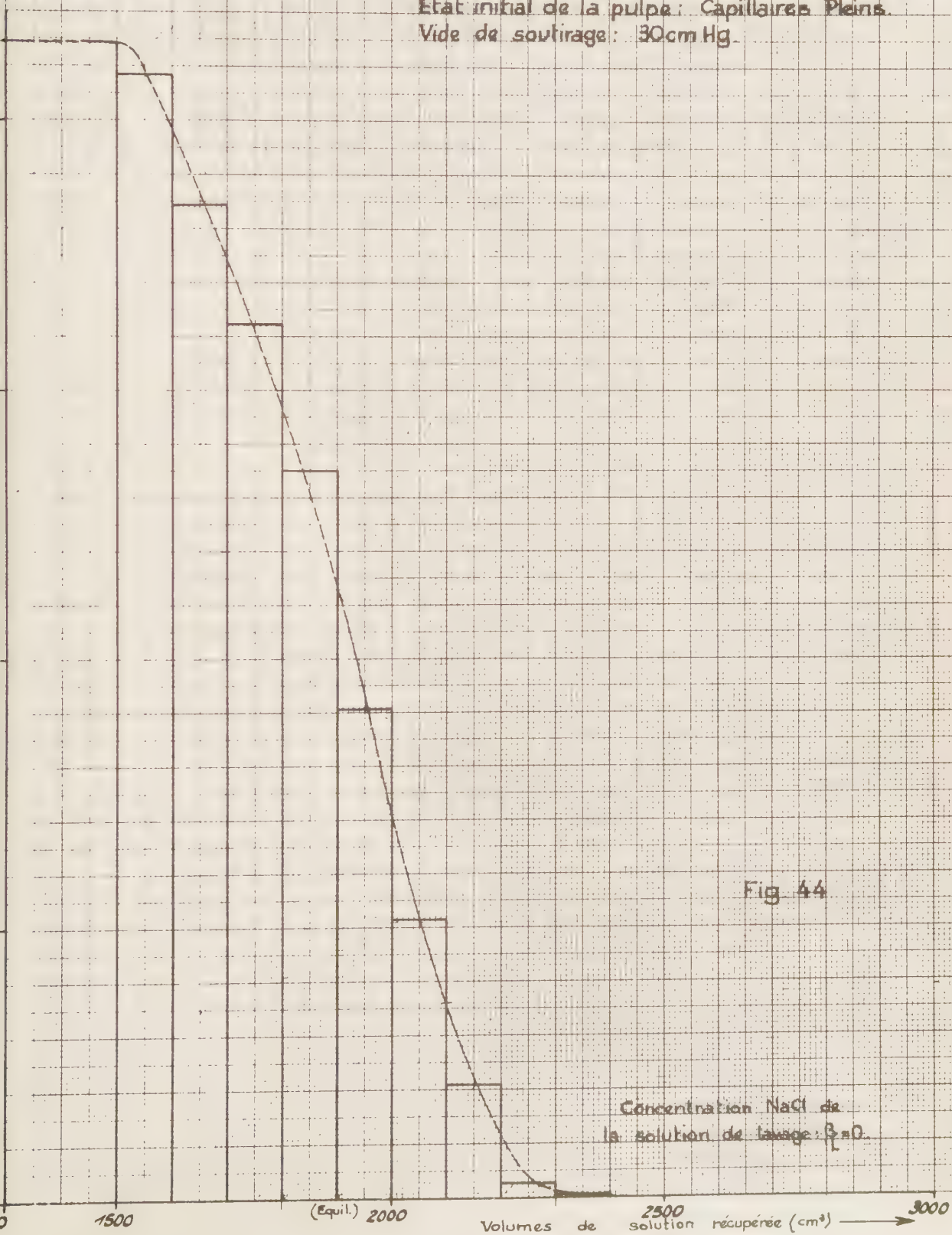


LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 40 cm.

Etat initial de la pulpe : Capillaires Pleins.

Vide de soutirage : 30cm Hg.



LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Hauteur de sel : 40 cm.
Etat initial de la pulpe : Capillaires partiellement Vides.
Vide de soufflage : 30 cm Hg.

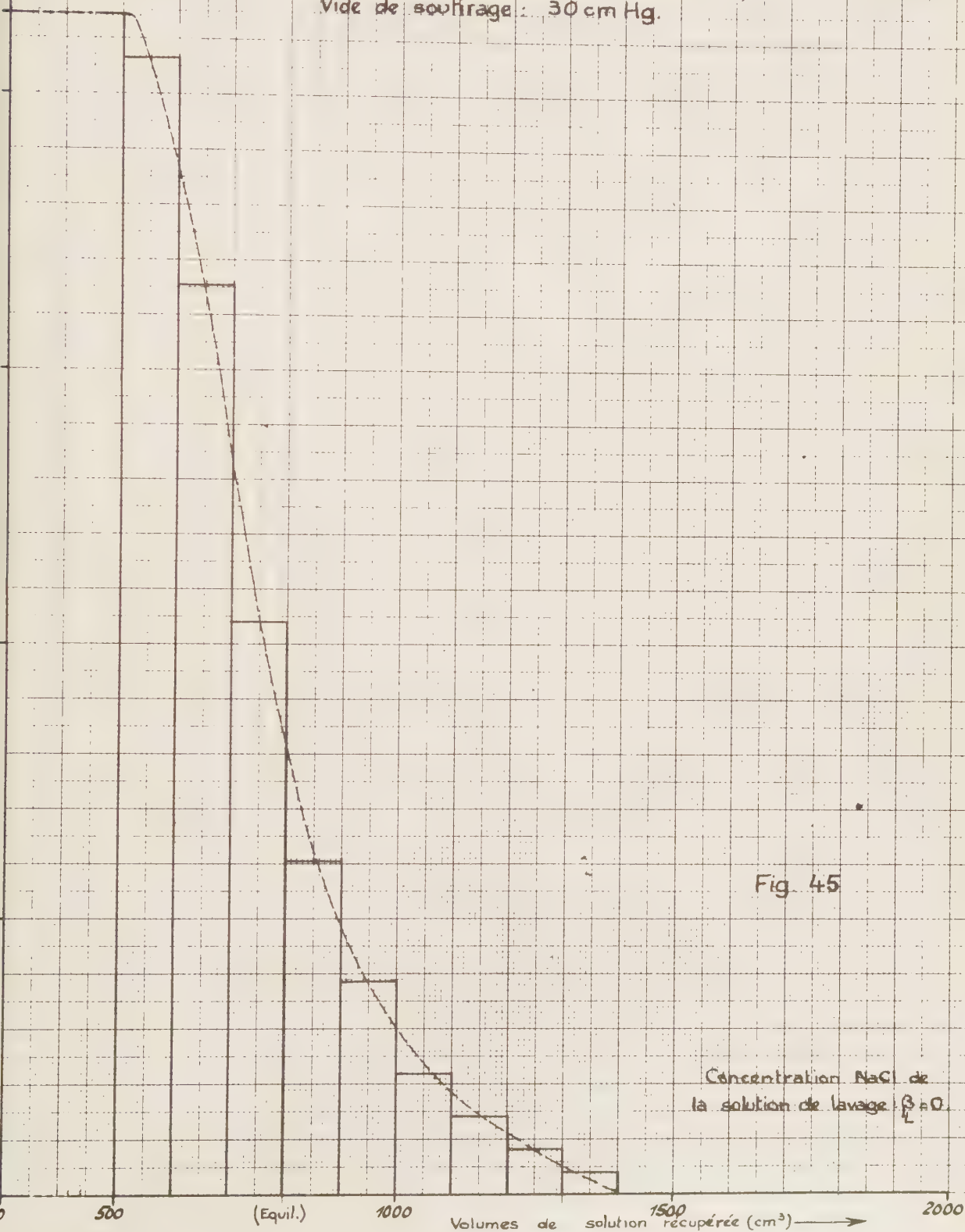


Fig. 45

Concentration NaCl de
la solution de lavage β

Volumes de solution récupérée (cm^3)

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Influence de la hauteur de sel

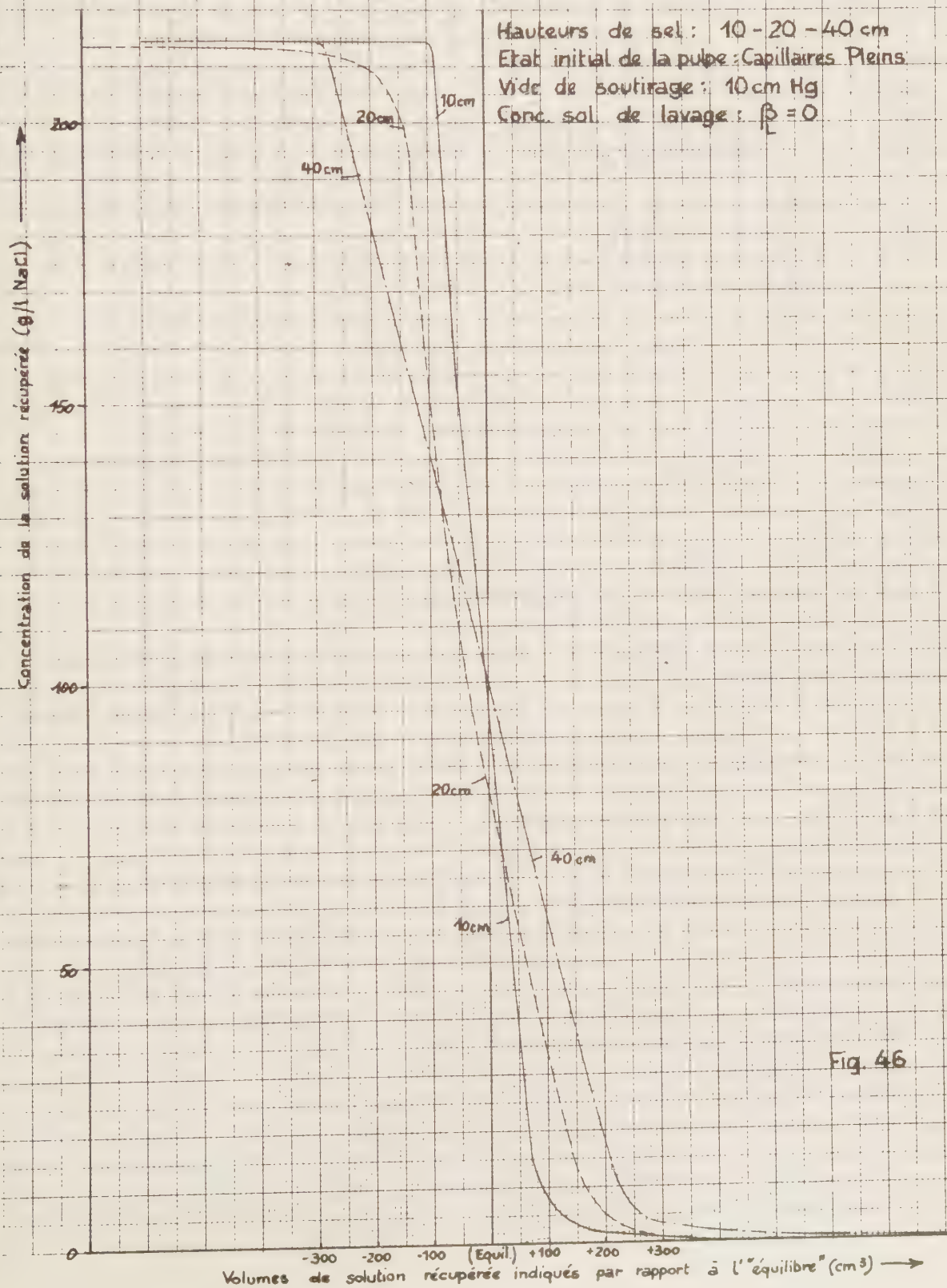
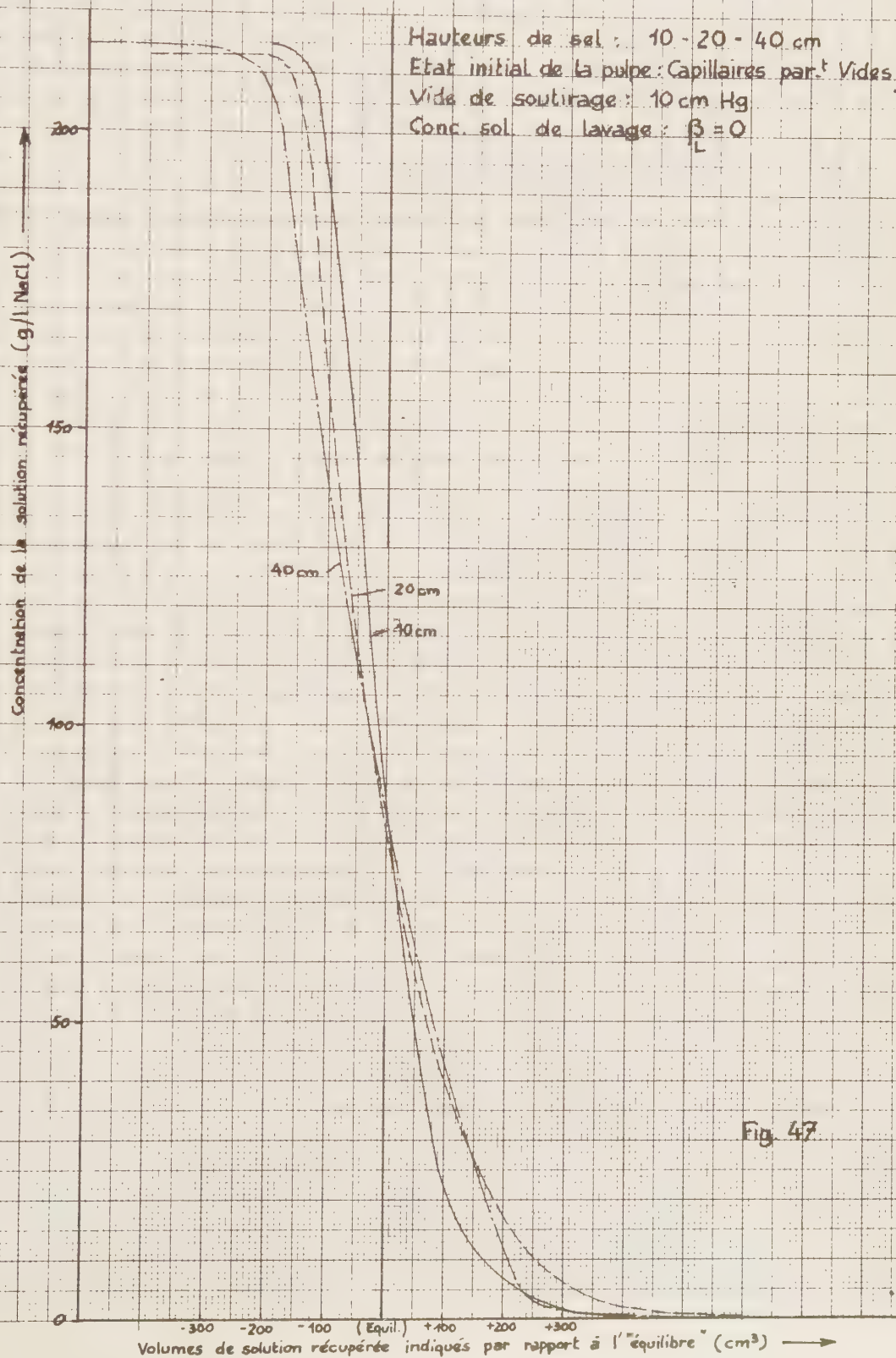


Fig. 46

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Influence de la hauteur de sel



LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Influence de la hauteur de sel

Hauteurs de sel : 10 - 20 - 40 cm

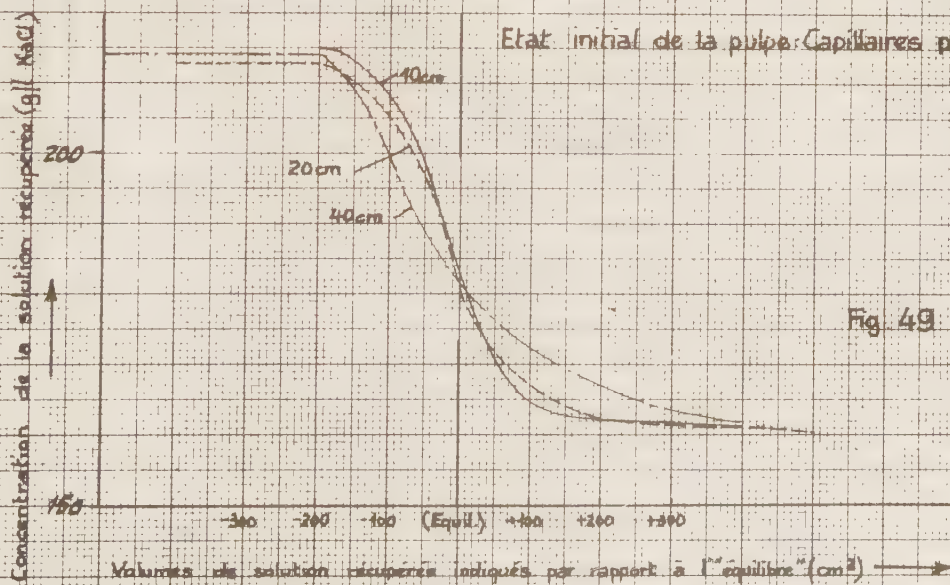
Vide de soutirage : 10 cm Hg

Conc. sol. de lavage : $\beta = \frac{3}{4} \beta_0$

Etat initial de la pulpe : Capillaires Pleins



Etat initial de la pulpe : Capillaires part Vides



LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Influence de l'état initial de la pulpe
et du vide de soutirage

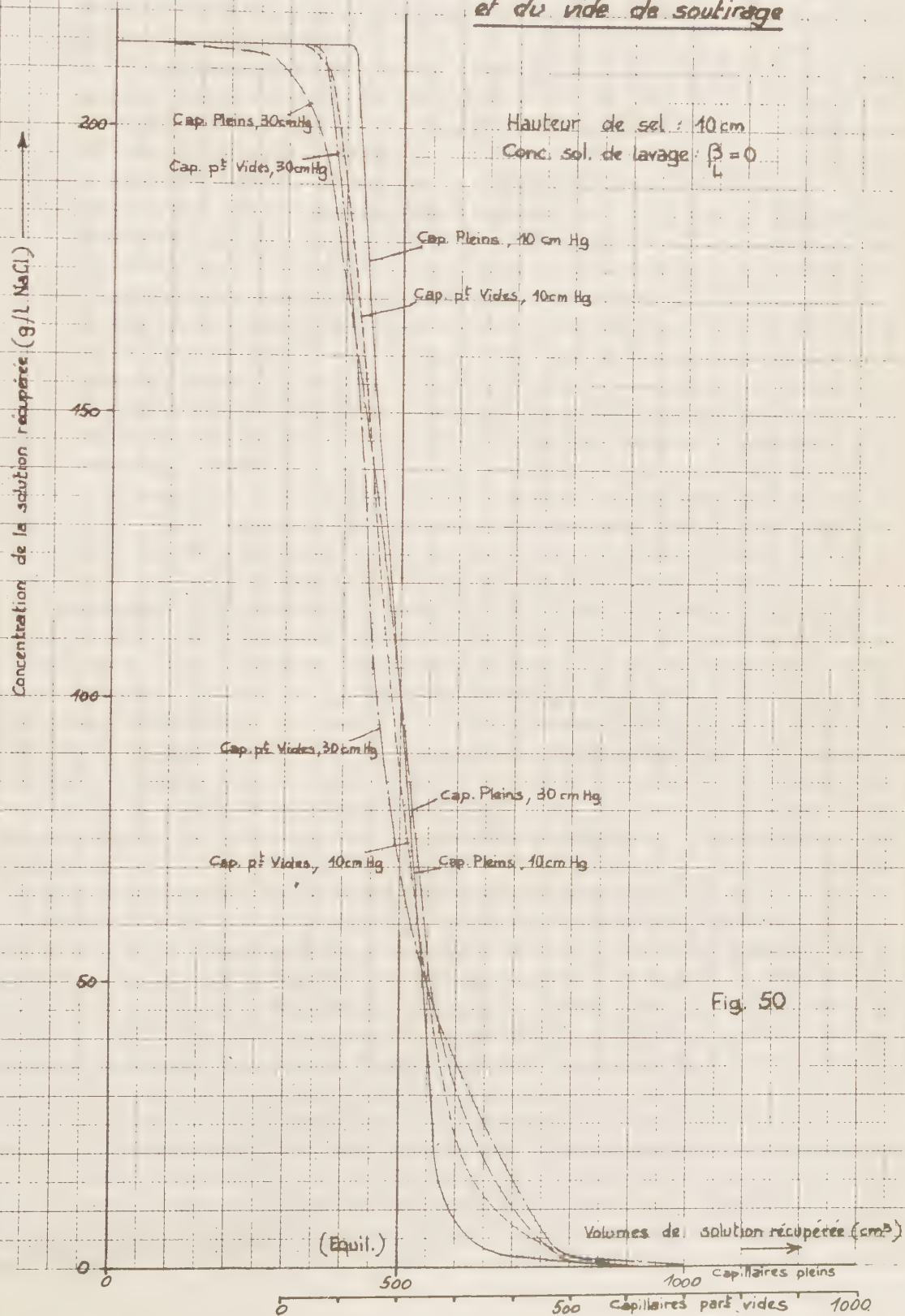


Fig. 50

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EQOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Influence de l'état initial de la pulpe

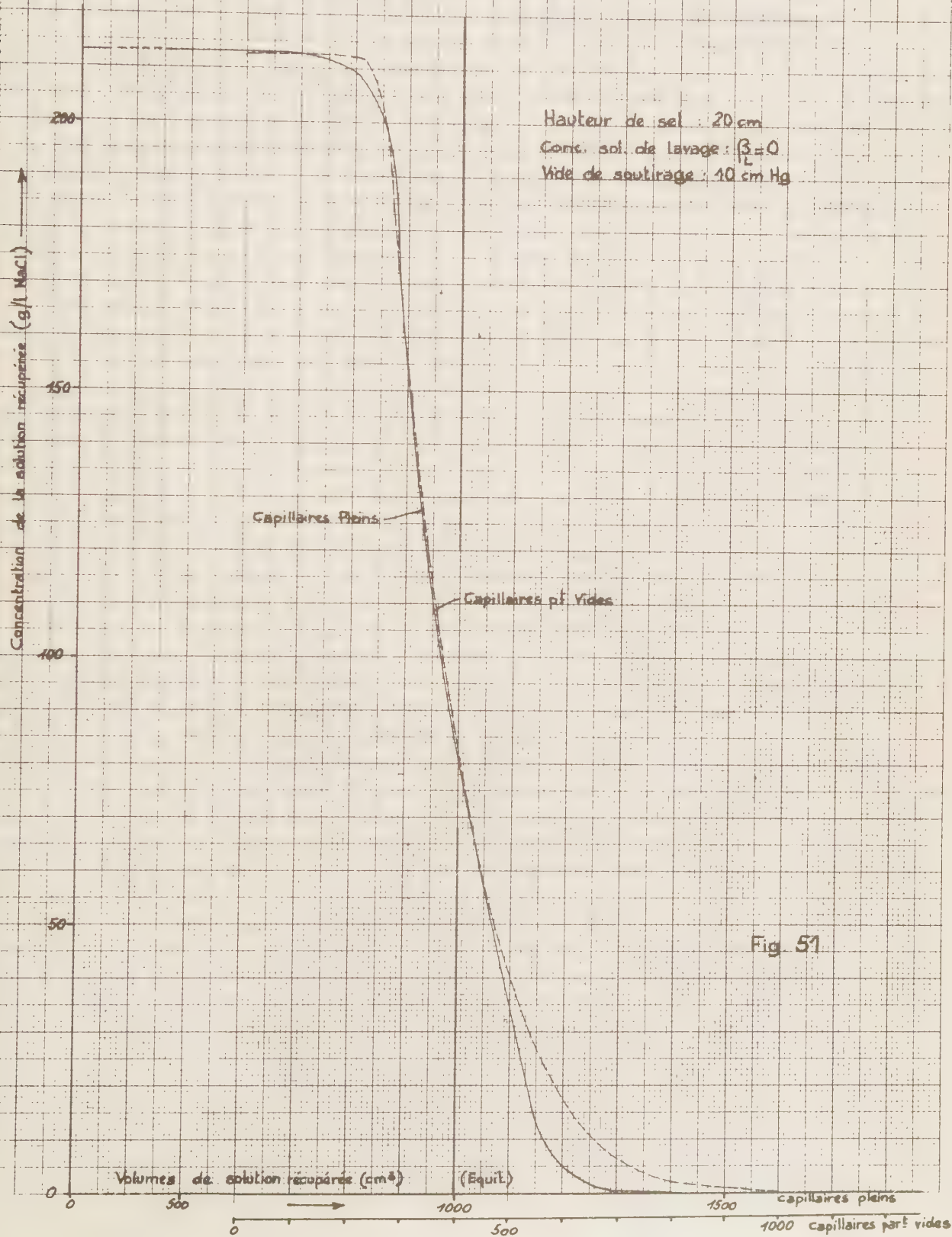
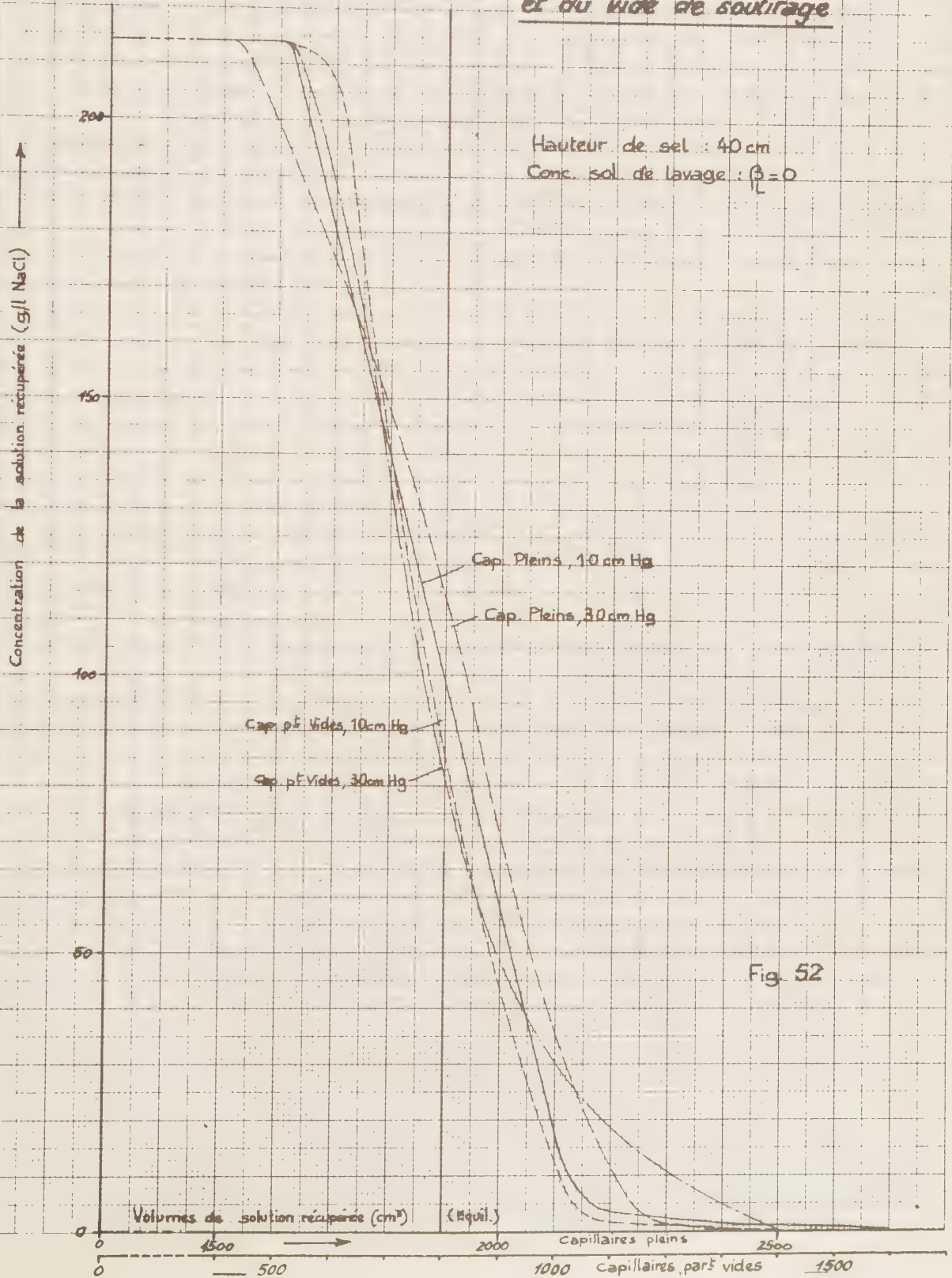


Fig. 51

LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Influence de l'état initial de la pulpe
et du vide de soutirage

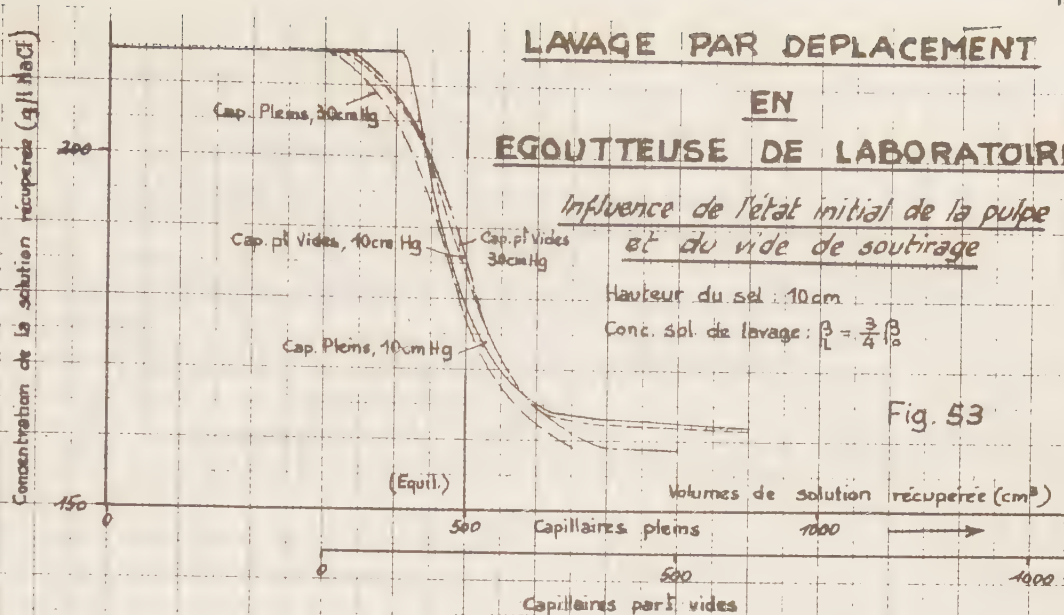


LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Influence de l'état initial de la pulpe
et du vide de soutirage

Hauteur du sel : 10 cm

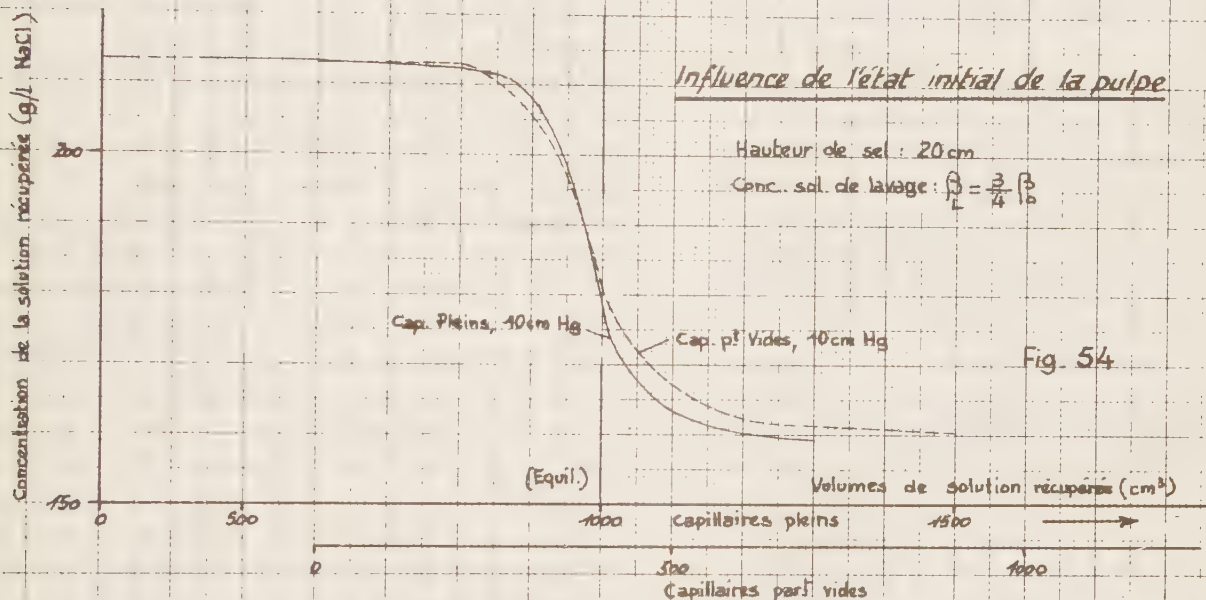
Conc. sol. de lavage : $\beta_L = \frac{3}{4} \beta_0$



Influence de l'état initial de la pulpe

Hauteur de sel : 20 cm

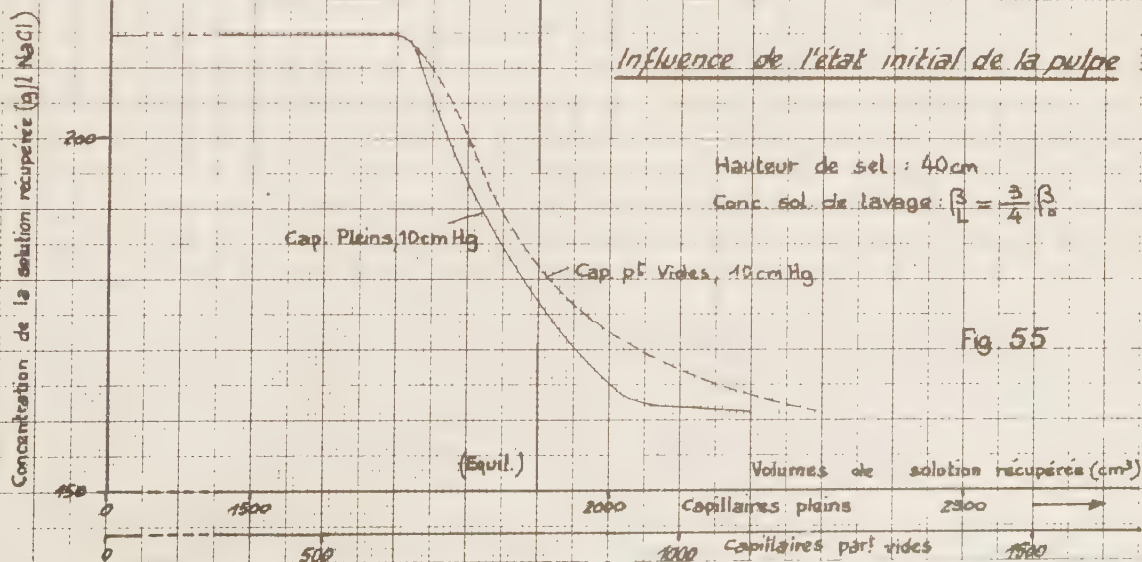
Conc. sol. de lavage : $\beta_L = \frac{3}{4} \beta_0$



Influence de l'état initial de la pulpe

Hauteur de sel : 40 cm

Conc. sol. de lavage : $\beta_L = \frac{3}{4} \beta_0$



LAVAGE PAR DEPLACEMENT EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Rendements moyens de lavage en fonction de la hauteur de sel
pour les deux états initiaux de la pulpe

(Vide de soutirage: 10 cm Hg)

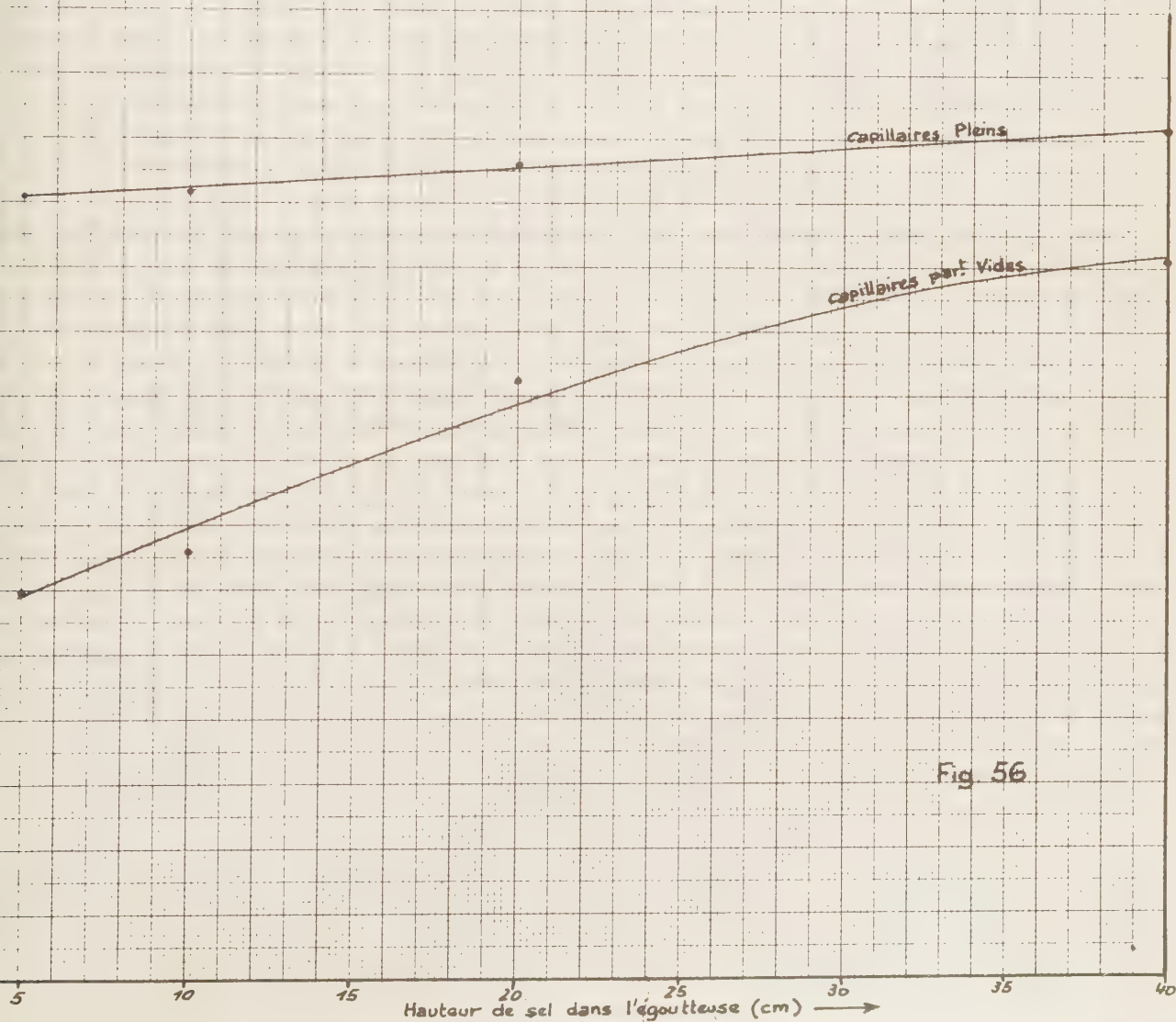


Fig 56

LAVAGE PAR DEPLACEMENT
EN EGOUTTEUSE DE LABORATOIRE

Débits de soutirage aux deux vides de 10 et 30 cm Hg
pour les hauteurs de sel de 10 et 40 cm.

(Etat initial de la pulpe: Capillaires Pleins)

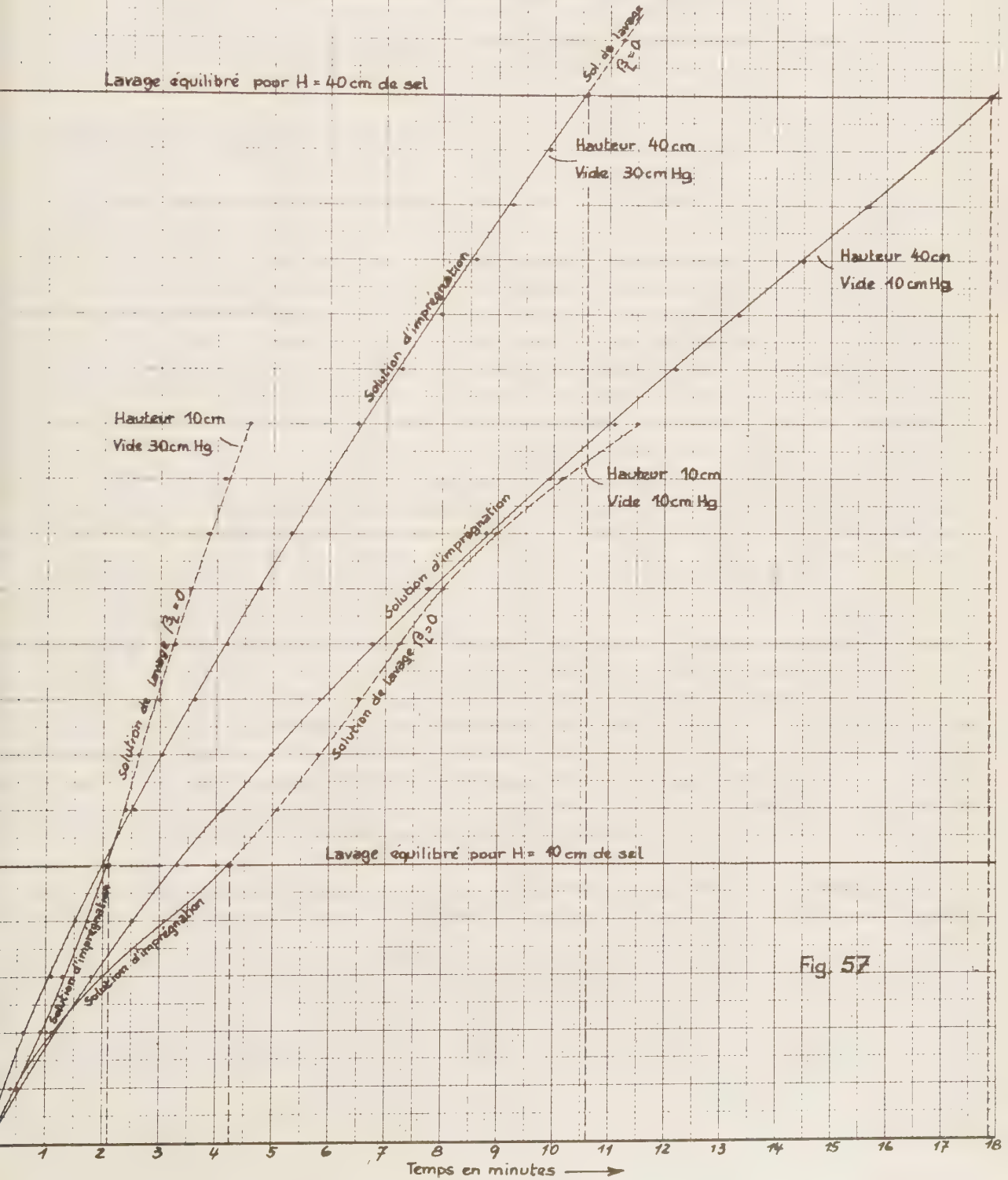


Fig. 57

SIGNIFICATION DES PRINCIPALES EXPRESSIONS

Lavage à contre-courant ou méthodique

Composition (ou titre) : proportion ou fraction massique d'un constituant dans une pulpe ou une solution.

Concentration : masse de soluté par unité de volume ou de masse de solution ou par unité de masse de solvant.

Déséquilibre du lavage : différence entre la quantité de liquide de lavage ajoutée dans le dernier laveur et la quantité correspondante (volume de solution, masse de solution ou de solvant) emportée sous forme de solution d'imprégnation par la pulpe finale ($\varepsilon = L - a_n$). D'une manière plus générale, différence constante entre la quantité de liquide qui sort à l'effluent d'un décanteur-laveur et celle qui entre dans ce même décanteur avec la pulpe à laver ($\varepsilon = E_p - a_{p-1}$). On peut dire également que le déséquilibre du lavage représente le flux net de solution ou de solvant, compté positivement dans le sens contraire au sens d'écoulement de la pulpe.

Dilution : volume de solution, masse de solution ou masse de solvant associés dans une pulpe à l'unité de masse d'insoluble (et, par extension, à la masse (i) d'insoluble de référence).

Effluent : quantité de solution clarifiée sortant d'un étage de lavage. Trop-plein ou surverse d'un décanteur-laveur.

Epaississement : inverse de la dilution, c'est-à-dire masse d'insoluble par unité de volume ou de masse de solution ou par unité de masse de solvant.

Flux net de soluté : différence entre la masse de soluté qui, par unité de masse d'insoluble, entre avec la pulpe à laver dans un décanteur-laveur et celle qui sort avec l'effluent ou solution clarifiée du même décanteur ($F = b_{p-1} - B_p$). Le flux net de soluté est compté positivement dans le sens d'écoulement de la pulpe.

Lavage à équi-épaississement : lavage dans lequel les dilutions des pulpes épaissies sont, à tous les étages, égales à la dilution de la pulpe initiale.

Lavage à homogénéisation complète : lavage dans lequel les pulpes épaissies et les solutions de lavage sont parfaitement mélangées à l'entrée des différents étages.

Lavage à homogénéisation incomplète : lavage dans lequel les pulpes épaissies et les solutions de lavage sont imparfaitement mélangées à l'entrée des différents étages (lavage à dilution imparfaite ou lavage par déplacement).

Lavage déséquilibré par défaut : lavage à déséquilibre (ou à flux net de solution ou de solvant) négatif.

Lavage déséquilibré par excès : lavage à déséquilibre (ou à flux net de solution ou de solvant) positif.

Lavage équilibré : lavage à déséquilibre (ou à flux net de solution ou de solvant) nul. On peut encore dire qu'un lavage équilibré est un lavage tel que la quantité de liquide de lavage (évaluée en solution ou en solvant) est égale à la quantité correspondante de solution contenue dans la pulpe finale, ou encore tel que la quantité de solution récupérée est égale à la quantité correspondante de solution contenue dans la pulpe initiale.

Pulpe : suspension de particules ou de grains solides au sein d'une solution contenant un ou plusieurs solutés (une partie des solutés pouvant toutefois se trouver à l'état solide ou indissous dans la pulpe considérée). Les particules en suspension sont appelées indifféremment "solides" ou "insolubles" (on dit aussi : "inertes").

Pulpe finale (appelée encore : pulpe lavée ou pulpe résiduelle) : pulpe sortant de l'installation de lavage.

Pulpe initiale (appelée encore : pulpe d'alimentation) : pulpe entrant dans l'installation de lavage.

Pulpe utile : pulpe fictive ramenée à trois constituants, dans laquelle on ne considère, en plus de l'insoluble et du solvant, que l'unique soluté intéressant (ou le soluté global formé par l'ensemble des solutés intéressants). Les caractéristiques relatives à une telle pulpe sont dites caractéristiques "utiles".

Solution récupérée : solution clarifiée sortant à l'effluent du premier laveur.

°
° °

LISTE DES SYMBOLES UTILISES

Lavage à contre-courant ou méthodique

Théorie algébrique

- a : dilution d'une pulpe, c'est-à-dire volume de solution, masse de solution ou masse de solvant associés dans la pulpe à l'unité de masse d'insoluble.
- a', a'' : dilutions fictives introduites dans la théorie du lavage à homogénéisation incomplète (respectivement pour la dilution imparfaite et le déplacement).
- b : masse de soluté associée dans une pulpe à l'unité de masse d'insoluble.
- b* : masse totale de soluté contenue dans une pulpe par unité de masse d'insoluble, dont une partie se trouve à l'état solide ou indissous.
- B : masse de soluté contenue par unité de masse d'insoluble dans les solutions clarifiées ou effluents.
- c : épaissement d'une pulpe (égal à l'inverse de la dilution : $c = 1/a$).
- c', c'' : épaissements fictifs introduits dans la théorie du lavage à homogénéisation incomplète (respectivement pour la dilution imparfaite et le déplacement).
- d : masse de soluté à l'état solide contenue dans une pulpe par unité de masse d'insoluble.
- E : effluent ou extrait, c'est-à-dire volume de solution, masse de solution ou masse de solvant qui, par unité de masse d'insoluble traité, sont contenus dans la solution clarifiée sortant d'un étage de lavage.
- E', E'' : effluents fictifs introduits dans la théorie du lavage à homogénéisation incomplète (respectivement pour la dilution imparfaite et le déplacement).
- f : rapport de la masse de soluté à l'état solide à la masse de soluté à l'état dissous contenues dans une pulpe par unité de masse d'insoluble ($f = b/d$).
- F : flux net de soluté.
- i : masse d'insoluble de référence (pouvant en particulier être l'unité de masse).

- : nombre entier allant de 0 à $n+1$ ($j = 0, 1, \dots, n, n+1$) utilisé en indice (l'indice 0 se rapporte à la pulpe initiale, l'indice $n+1 \equiv L$ au liquide de lavage).
- : rapport de la quantité E_p de solution ou de solvant contenue dans la solution clarifiée sortant du p ième laveur, à la quantité a_{p-1} de solution ou de solvant introduite dans le même laveur par la pulpe épaissie provenant du $(p-1)$ ième laveur ($k_p = E_p/a_{p-1}$).
- k'' : rapports fictifs introduits dans la théorie du lavage à homogénéisation incomplète (respectivement pour la dilution imparfaite et le déplacement).
- : facteur dépendant des paramètres du lavage et égal au coefficient de β_0 dans l'expression de la concentration β à un étage quelconque.
- k' : facteur dépendant des paramètres du lavage et égal au coefficient de β_0 dans l'expression de la concentration β' de la solution clarifiée à un étage quelconque (lavage à homogénéisation incomplète).
- k'' : facteur dépendant des paramètres du lavage et égal au coefficient de β_0 dans l'expression de la concentration β'' de la solution d'imprégnation de la pulpe épaissie à un étage quelconque (lavage à homogénéisation incomplète).
- : volume de solution, masse de solution ou masse de solvant utilisés sous forme de liquide de lavage par unité de masse d'insoluble (avec $L \equiv E_{n+1}$).
- L : quantité minimale de liquide de lavage nécessaire à la dissolution de la masse de soluté indissous contenue dans la pulpe initiale par unité de masse d'insoluble.
- : nombre d'étages de lavage.
- : rang ou numéro d'ordre d'un étage de lavage (les étages étant numérotés dans le sens d'écoulement de la pulpe).
- : perte relative de lavage proprement dit, exprimée en fraction de l'unité.
- P : perte absolue, c'est-à-dire quantité totale de soluté perdue par unité de masse d'insoluble.
- : rendement de lavage proprement dit, exprimé en fraction de l'unité.
- R : récupération absolue, c'est-à-dire quantité totale de soluté récupérée par unité de masse d'insoluble.
- : débit total horaire d'insoluble dans une installation de lavage.
- S : débit total horaire d'eau utilisée sous forme de liquide de lavage dans une installation.
- s, z : compositions (appelées encore : titres ou fractions massiques) d'une pulpe respectivement en solvant, soluté et insoluble.
- s, y' : compositions d'une solution clarifiée respectivement en solvant et soluté.

- β : concentration en soluté d'une solution, c'est-à-dire masse de soluté par unité de volume ou de masse de solution ou par unité de masse de solvant.
- β^* : concentration fictive globale relative à la totalité du soluté dissous et indissous, et évaluée par rapport au solvant.
- β' : concentration moyenne en soluté d'une solution clarifiée, dans le cas d'un lavage à homogénéisation incomplète.
- β'' : concentration moyenne en soluté de la solution d'imprégnation d'une pulpe épaissie, dans le cas d'un lavage à homogénéisation incomplète.
- ε : déséquilibre du lavage.
- λ : rapport des quantités de solution ou de solvant dans les effluents aux quantités correspondantes dans les solutions d'imprégnation des pulpes épaissies, pour un lavage à équi-épaississement.
- π : concentration relative de la solution d'imprégnation de la pulpe finale.
- ρ : concentration relative de la solution récupérée.
- σ : coefficient de dilution, caractérisant le degré d'homogénéisation à un étage dans un lavage par dilution.
- τ : coefficient de déplacement, caractérisant le degré de déplacement à un étage dans un lavage par déplacement.

Méthodes graphiques

- a : quantité de solvant associée dans une pulpe à la masse (i) d'insoluble de référence.
- b : quantité de soluté associée dans une pulpe à la masse (i) d'insoluble.
- E : quantité de solvant dans une solution clarifiée ou effluent, correspondant à la masse (i) d'insoluble.
- B : quantité de soluté dans une solution clarifiée ou effluent, correspondant à la masse (i) d'insoluble.
- M : point représentatif (ou figuratif) d'une pulpe de mélange (résultant de l'addition de deux pulpes ou d'une pulpe et d'une solution).
- N, P : points représentatifs d'une pulpe.
- P* : point représentatif d'une pulpe dans laquelle une partie du soluté est à l'état solide ou indissous.
- S : point représentatif d'une solution.
- V (ou S_{n+1}) : point représentatif du liquide de lavage.
- Δ : "point de soustraction" ou point représentatif de la pulpe fictive obtenue en soustrayant de la pulpe épaissie provenant du laveur de rang (p - 1) et entrant dans le laveur de rang p, la solution clarifiée sortant à l'effluent du laveur de rang p.
- ε : déséquilibre du lavage relativement au solvant.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) M. PONCHON, *Technique Moderne*, 13, 20 et 55 (1921).
- (2) P. SAVARIT, *Arts et Métiers*, 75, 65 (1922).
- (3) W. L. McCABE et E. W. THIELE, *Ind. Eng. Chem.*, 17, 605 (1925).
- (4) TURNER, *Ind. Eng. Chem.*, 21, 140 (1929).
- (5) A. KREMSEK, *Nat. Petrol. News*, 22, N° 21, 42 (1930).
- (6) M. SOUDERS et G. G. BROWN, *Ind. Eng. Chem.*, 24, 519 (1932).
- (7) E. M. BAKER, *Chem. Met. Eng.*, 42, 699 (1935).
- (8) J. C. ELGIN, *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 32, 451 (1936).
- (9) W. L. BADGER et W. L. McCABE, "Elements of Chemical Engineering", McGraw-Hill Book Company, New-York (1936).
- (10) R. T. ARMSTRONG et K. KAMMERMEYER, *Ind. Eng. Chem.*, 34, 1228 (1942).
- (11) C. O. KING, D. L. KATZ et J. C. BRIER, *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 40, 553 (1944).
- (12) B. F. RUTH, *Chem. Eng. Progr.*, 44, 71 (1948).
- (13) M. G. MASTIN, *Chem. Eng.*, 57, N° 1, 100 (1950).
- (14) J. A. GROSBURG, *Ind. Eng. Chem.*, 42, N° 1, 154 (1950).
- (15) T. B. COUNSELMAN, *Trans. Am. Inst. Min. Eng.*, 187, 223 (1950).
- (16) R. OREL, *Chem. et Ind.*, 64, N° 1, 37 (1950).
- (17) J. H. PERRY, "Chemical Engineers' Handbook", McGraw-Hill Book Company, New-York (1950).
- (18) E. B. FITCH, *Chem. Eng. Progr.*, 47, N° 2, 83 (1951).
- (19) Y. SCHWOB, *Chim. et Ind.*, 69, N° 4, 646 (1953).
- (20) E. G. SCHEIBEL, *Chem. Eng. Progr.*, 49, 354 (1953).
- (21) E. G. SCHEIBEL, *Ind. Eng. Chem.*, 46, N° 1, 16 (1954).
- (22) J. K. PERKINS, H. S. WELSH et J. H. MAPPUS, *T. A. P. P. I.*, 37, N° 3, 83 (1954).
- (23) W. L. McCABE et J. C. SMITH, "Unit Operations of Chemical Engineering", McGraw-Hill Book Company, New-York (1956).
- (24) B. ARMSTRONG, *Southern Pulp and Paper Manufacturer*, 20, N° 2, 56 (1957).
- (25) R. S. OLSON, *Chem. Eng.*, 65, N° 20, 142 (1958).
- (26) J. G. WENDELL, *Chem. Eng.*, 66, N° 3, 111 (1959).
- (27) L. ALDERS, "Liquid-Liquid Extraction", Elsevier Publishing Company, Amsterdam (1959).
- (28) P. LE GOFF, "Cours de Génie Chimique de L'E.N.S.I.C.", Nancy (1961).
- (29) B. FITCH, *Chem. Eng.*, 69, N° 2, 119 (1962).
- (30) J. COATES et B. S. PRESSBURG, *Chem. Eng.*, 69, N° 2, 125 (1962).

- 31) J.M.COULSON et J.F.RICHARDSON, "Chemical Engineering", Pergamon Press, London (1962).
- 32) R.BERTHON, "Représentation des équilibres de solubilités et utilisation des diagrammes", Gauthier-Villars, Paris (1962).
- 33) J.E.COLMAN, Chem.Eng., 70, N° 5, 93 (1963).
- 34) A.G.OBERG et S.C.JONES, Chem.Eng., 70, N° 15, 119 (1963).
- 35) N.H.CHEN, Chem.Eng., 71, N° 24, 125 (1964).
- 36) R.N.RICKLES, Chem.Eng., 72, N° 6, 157 (1965).
- 37) W.P.TALMAGE, Chem.Eng., 73, N° 9, 192 (1966).

°
° °

TABLE DES MATIERES

	Pages
CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EXTRACTION SOLIDE-LIQUIDE	1
Sommaire	2
I - INTRODUCTION	3
Sommaire	4
PRELIMINAIRES ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	6
II - LAVAGE PAR DILUTION (Lavage à contre-courant ou méthodique) .	14
Sommaire	15
A - GENERALITES	17
B - THEORIE ALGEBRIQUE	21
1) CAS DE L'HOMOGENEISATION COMPLETE	21
a) Lavage à épaississements quelconques	21
b) Lavage à équi-épaississement	35
c) Lavage dans lequel une partie du soluté de la pulpe ini- tiale est à l'état solide ou indissous. Lavages poly- thermes	37
2) CAS DE L'HOMOGENEISATION INCOMPLETE	41
3) EXEMPLES NUMERIQUES	47
a) Homogénéisation complète	47
b) Homogénéisation incomplète	50
C - METHODES GRAPHIQUES	53
1) Méthode fondée sur l'utilisation des Compositions sur le diagramme triangulaire	54
2) Méthode fondée sur l'utilisation des Quantités de solvant et de soluté associées à la masse (i) d'insoluble de référé- rence	71
3) Méthode fondée sur l'utilisation des Concentrations par l'intermédiaire des droites d'opération et de partage	79

	Pages
III - LAVAGE PAR DEPLACEMENT	86
Sommaire	87
A - CONSIDERATIONS THEORIQUES	89
B - TRAVAIL EXPERIMENTAL	94
1) Exposé du problème	94
2) Appareillage	95
3) Paramètres étudiés	95
a) Paramètres fixes	95
b) Paramètres variables	97
4) Caractérisation des résultats	102
5) Présentation des résultats	104
6) Interprétation des résultats. Influence des différents pa- ramètres	106
7) Conclusion	108
Données numériques (Tableaux et Graphiques)	111
SIGNIFICATION DES PRINCIPALES EXPRESSIONS	137
LISTE DES SYMBOLES UTILISES	139
BIBLIOGRAPHIE	142
TABLE DES MATIERES	144

Nom : CHATAIGNON Jean
Nature de la Thèse : Doctorat d'Université
Titre de la Thèse : "Contribution à l'étude de l'extraction
solide-liquide".

Vu et Approuvé
Nancy, le 27 février 1967
Le Doyen
A. AUBRY

Vu et Permis d'Imprimer
Nancy, le 28 février 1967
Le Recteur
Président du Conseil de
l'Université
P. IMBS

